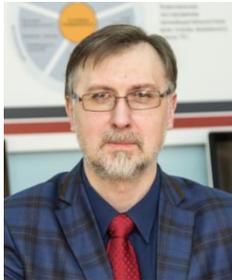


УДК 523.745:550:38:631.559(470.56)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФЛУКТУАЦИЙ КАК ПРОБЛЕМА BIG DATA



А.Г. Давыдовский

Доцент кафедры инженерной психологии и эргономики факультета компьютерного проектирования БГУИР, кандидат биологических наук, доцент



Д.В. Лихачевский

Декан факультета компьютерного проектирования БГУИР, кандидат технических наук, доцент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Республика Беларусь
E-mail: agd2011@list.ru; likhachevskyd@bsuir.by

А.Г. Давыдовский

Доцент кафедры инженерной психологии и эргономики факультета компьютерного проектирования БГУИР, кандидат биологических наук, доцент. Специальность «Биология». Окончил докторантуру БГУИР по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации». Проводит научные исследования в области социальной информатики, математического моделирования биологических и биосоциальных систем, методологии превентивного управления рисками в социотехнических и инновационных производственных системах. Член ряда международных научных обществ. Автор учебных программ и пособий для студентов и магистрантов.

Д.В. Лихачевский

Декан факультета компьютерного проектирования. Доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем ФКП БГУИР. Специальность «Телекоммуникационные системы». Проводит научные исследования в области телекоммуникационных систем и технологий, антенных и сверхвысокочастотных устройств, организации и управления инновационными образовательными системами. Руководит научной работой студентов I и II ступеней высшего образования. Является организатором и руководителем ряда международных научных и научно-практических форумов.

Аннотация. Рассмотрены проблемы математического моделирования продуктивности агрофитоценозов в условия аридного климата и погодно-климатических флуктуаций. Разработаны и проанализированы регрессионные математические модели, описывающие динамику экспорта и импорта пшеницы в период с 2000 по 2014 год. Представлены основы методологии геоагробииоинформатики как новой области фундаментальных и прикладных исследований для повышения продуктивности агрофитоценозов.

Ключевые слова: математическое моделирование, агрофитоценоз, аридный климат, погодно-климатические флуктуации.

Введение. С 1990-х годов в США, России, Японии, Китае, Германии, Англии, Дании, Нидерландах, Франции и в странах Восточной Европы широкое распространение получили формы земледелия, интегрально обозначаемые термином «точное земледелие» (Precision

Agriculture). Точное земледелие предусматривает высокую дифференцируемость технологических операций, производимых в различные периоды возделывания агрокультур как на одном поле, так и в масштабах сложного агрофитоценоза. В свою очередь, агрофитоценоз – это искусственно созданная и поддерживаемая человеком экологическая система (поле, сенокос, парк, сад, огород, лесная посадка) для получения сельскохозяйственной продукции. Различные агрофитоценозы занимают около 10% площади суши и производят многие млрд. т. сельскохозяйственной продукции. Численность популяций агрокультурных растений в агрофитоценозе поддерживается и контролируется человеком с помощью системы агротехнологических мероприятий, включающих борьбу с сорняками и вредителями, орошение земель, управление сменой агрокультур, повышение плодородия почвы. В агрофитоценозе, как и в естественном биоценозе, складываются собственные пищевые цепи, обязательным звеном в которых является человек. При этом он выступает как консумент I порядка, который завершает пищевую цепь. Как правило, без участия человека агрофитоценозы существуют от 1 года (зерновые, овощные) до 20-25 лет (плодово-ягодные) [1, 2].

При этом проблема развития цифровых агротехнологий тесно связано с внедрением новых информационных технологий агрегации и обработки больших потоков данных Big Data, а также алгоритмов «глубокого обучения» нейронных сетей (Deep Learning), которые могли бы обеспечить рациональное использование средств агропромышленного комплекса (АПК) и позволяют качественно улучшить информационное обеспечение для принятия оптимальных управленческих решений. Кроме того, «цифровая революция» в АПК характеризуется как переход к эпохе цифровых агротехнологий, развитие которых требует создания математических, агрофизических и имитационных моделей, позволяющих прогнозировать последствия процессов культивации земель, внесения удобрений, посева, выращивания и сбора урожая, рекультивации и реабилитации посевных и/или пастбищных площадей, а также оптимизации комплекса мелиоративных мероприятий [3].

Подобные математические, агрофизические, имитационные и информационные модели, в дальнейшем реализуемые в формате программного обеспечения, позволяют комплексно учитывать такие факторы, как:

- агрофизические – физико-химические характеристики почв, мезо- и микроклиматические особенности, температурно-влажностные режимы агрофитоценоза в различные сезоны года и т.д.;

- агротехнологические – общая технологическая оснащенность данного агрофитоценоза, технологические особенности обработки и возделывания посевных и пастбищных площадей, продолжительность вегетационного периода в данном агрофитоценозе, мелиоративные ресурсы и мероприятия на обрабатываемых землях, человеческие, информационные, технологические, производственно-технологические ресурсы, финансово-материальные фонды хозяйства и т.д.;

- биоэкологические – состав биоты и геоэкологические особенности агрофитоценоза, включая флору и фауну, особенности водных и воздушных ресурсов, характеристики микроэлементного состава водных и почвенных ресурсов и т.д.;

- гелиофизические – солнечная активность (общее число Вольфа, а также числа Вольфа в северном и южном полушариях солнечного диска, количество солнечных вспышек классов C, M, X, а также интенсивность радиоизлучения и потоков корпускулярного излучения – так называемого «солнечного ветра») и т.д.;

- геофизические – географическая широта и долгота местности расположения агрофитоценоза, глобальная и локальная геомагнитная обстановка, количество геомагнитных бурь различных классов – от G1 до G5;

- климатические – среднегодовые и среднесезонные показатели температуры, количества осадков, интенсивность испарения с почвенного покрова, количество теплых и солнечных дней в году и т.д.

Современные модели агрофитоценозов характеризуются такими отличительными чертами [2], как:

1) наличие в программном решении помимо самой имитационной модели (то есть алгоритма бизнес-логики динамики изменения состояния агроэкосистемы) специализированной оболочки и современной инфраструктуры для проведения с ней многофакторных и поливариантных компьютерных экспериментов (идентификация, анализ чувствительности, модификация и «пересборка» компонентной структуры без перекомпиляции программного кода и т.д.);

2) универсальный характер модели, то есть использование единого качественного алгоритма для описания продукционного процесса любых культур в любых почвенно-климатических условиях;

3) вытекающая из указанных особенностей возможность непрерывного расчета модели в течение нескольких последовательных сезонов вегетации с учетом смены культур согласно моделируемой схеме хозяйственного севооборота.

Агроэкологические модели отражают влияние почвенных и погодных условий на продукционный процесс сельскохозяйственных растений, иначе говоря, на рост растений, их развитие и формирование конечного урожая. Дискуссии по поводу методов и подходов к математическому описанию агрофитоценозов в целом и отдельных процессов в системе «климат-почва-растение-атмосфера» сменились эпохой разработки готовых моделей, ориентированных на решение практических проблем. Также сформировались основные школы моделирования агрофитоценозов, в рамках которых создаются новые семейства динамических моделей, базирующиеся на единой методологии.

При этом характерная для любой зрелой отрасли экономики монополизация «рынка моделирования» агрофитоценозов. Большое количество частных изолированных моделей конкретных культур от множества независимых разработчиков сменилось сравнительно небольшим числом мощных и универсальных модельных комплексов от ведущих мировых школ моделирования, таких как DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, США), APSIM (Agricultural Production Systems SIMulator, Австралия).

Цель исследования – разработка и анализ математических моделей продуктивности агрофитоценозов в условиях аридного климата и погодно-климатических флуктуаций на основе динамики параметров солнечной и геомагнитной активности.

Агрофитоценозы в условиях аридного климата. Одной из актуальных проблем развития современного АПК является разработка научной методологии и технологических решений, которые обеспечили бы повышение продуктивности агрофитоценозов и урожайности возделываемых агрокультур в условиях глобальных и локальных погодно-климатических флуктуаций, оказывающих существенное влияние на продуктивность различных отраслей растениеводства. Наиболее заметно это в странах с засушливым, аридным климатом. Традиционно выделяют два или три подтипа аридного климата – климат жарких пустынь, климат холодных пустынь и иногда мягкий климат пустынь. Для разграничения климата жарких и холодных пустынь обычно используется три изотермы: среднегодовой температуры воздуха в 18 °С, средней температуры самого холодного месяца, равной 0°С или –3°С. В случае, если температура ниже указанных значений, то климат классифицируется как климат холодных пустынь, если температура выше указанных значений, то – как климат жарких пустынь [4].

Регионы с климатом жарких пустынь расположены, как правило, к югу от субтропического пояса и для них характерна малооблачная погода в течение всего года благодаря стабильным нисходящим потокам воздуха и устойчиво высокому атмосферному давлению. Эти регионы расположены между 30 градусами южной и 30 градусами северной широты. Для регионов с жарким подтипом аридного климата характерна жаркая и экстремально жаркая погода в течение всего года с абсолютными максимумами температур в 40°С (104°F)

и более 45°C (113°F). Тем не менее, в отдельные месяцы ночные температуры могут опускаться ниже 0°C в связи с исключительными потерями тепла под безоблачным небом. Климат жарких пустынь характерен для Северной Африки (пустыня Сахара, Ливийская и Нубийская пустыни); пустынь Африканского Рога, Южной Африки (пустыни Намиб и Калахари), Среднего Востока (Аравийская пустыня, Сирийская пустыня), Южной Азии (пустыня Тар), США, Мексики, (Мохаве, Сонора, Чиуауа), Австралии (Симпсон, Большая пустыня Виктория) и других регионов. Для холодных пустынь характерно жаркое (иногда экстремально жаркое) и засушливое лето. Регионы с холодным климатом пустынь обычно располагаются в более высоких широтах по сравнению с регионами с жарким вариантом аридного климата. Пример региона с холодным аридным климатом – пустыня Гоби (Монголия). Для неё характерны жаркое лето и очень холодные зимы благодаря переносу воздушных холодных масс из Сибири и Центральной Азии. Пустыни Кызылкум и Такла-Макан в Центральной Азии, район Ладакх (Индия) и засушливые области Пустыни Большого Бассейна (запад США) [5, 6].

Очевидно, что в условиях аридного климата важное прогностическое значение имеет системный анализ комплекса агрофизических, агротехнологических, биоэкологических, гелиофизических, геофизических, климатических параметров. При этом особое значение для эффективности прогнозирования продуктивности агрофитоценозов с помощью математического моделирования имеют среднегодовые и среднесезонные показатели температуры, количества осадков, интенсивности испарения с почвенного покрова, количество теплых и солнечных дней в году. При этом необходимо подчеркнуть особенно важное прогностическое значение параметров солнечной и геомагнитной активности [7].

Математическое моделирование продуктивности агрофитоценозов в условиях погодно-климатических флуктуаций. Именно земледелие является на сегодняшний день сферой приложения самых наукоемких и прорывных технологий – космических, геоинформационных и биоинженерных. За прошедшие 20 лет произошли революционные изменения не только в сфере компьютерных технологий (то есть в технической инструментации моделирования), но и принципиально сменилась сама парадигма аграрного производства – сельское хозяйство неожиданно превратилось из традиционного занятия в одну из самых быстроразвивающихся и технологичных отраслей человеческой деятельности. Продуктивность агрофитоценоза – многофакторный процесс и зависит от продуктивности каждого отдельного растительного организма. В связи с этим предложены два базовых направления исследований:

- 1) моделирование продуктивности растительных организмов с учетом особенностей системы «климат–почва–ризосфера–растение»;
- 2) моделирование продуктивности агрофитоценоза как целостной искусственной экосистемы.

Моделирование продуктивности растений. Окружающая среда представляет собой резервуар питательного субстрата или ресурс роста. Ресурс автономно уменьшается (распадается) с течением времени. Скорость потребления ресурса определяется мощностью вегетативных органов. Доля ресурса, направляемая растением в каждый момент времени на рост вегетативных и генеративных органов, представляет собой управление.

Одной из простейших является модель, рассматривающая лишь два важнейших компартмента растения, – вегетативные и генеративные органы, каждый из которых описывается единственным показателем мощности [8].

Тогда простейший случай моделирования продуктивности отдельного растения можно записать в виде математической модели (1)–(5) :

$$\frac{dW_V}{dt} = u_V Z, \quad (1)$$

$$\frac{dW_G}{dt} = (1 - u_G)Z, \quad (2)$$

$$S = kW_V R. \quad (3)$$

$$S_C = \sigma_C W_V, S_N = \sigma_N W_V, \quad (4)$$

$$Z = \min\left(\frac{S_C}{f_C}, \frac{S_N}{f_N}\right). \quad (5)$$

В приведенных формулах W_G , W_V – «мощности» вегетативных и генеративных органов, R – ресурс, S – темп общего роста, k и X – коэффициенты роста структуры и распада ресурса (постоянные параметры).

В приведенных выше уравнениях под S_C и S_N понимаются потоки поглощенного углерода и азота, а параметры f_C и f_N имеют физический смысл их относительного содержания в структурной биомассе, тогда как σ_C и σ_N – параметры интенсивности поглощения азота и углерода. При желании нетрудно дать другие физические аналогии введенным абстрактным понятиям.

Пусть $L(X, Y, Z, t)$ – максимальное значение функционала цели, которое можно достичь при условии, что к моменту времени t величины динамических переменных модели достигли соответственно значений X , Y и Z . Заметим, что запись функционала в точечном, а не в интегральном виде (цель определяется исключительно конечным состоянием системы, но не ее траекторией) исключает появление в функции L явного выражения для накопленного к данному моменту показателя полезности. Дадим теперь времени малое виртуальное приращение Δt и запишем для него выражение для введенного функционала L .

В качестве функционала цели для данного случая выберем величину:

$$L = W_G(m) - W_G(T)T, \quad (6)$$

где T – интегральный показатель температуры воздуха и почвы.

Область рациональной реализации данной модели может быть ограничена условием:

$$u = \begin{cases} 0, & \frac{S_C}{f_C} > \frac{S_C}{f_C}, \\ 1, & \frac{S_C}{f_C} < \frac{S_C}{f_C}. \end{cases} \quad (7)$$

Данное условие математической модели можно интерпретировать как математическое описание строго вегетативной стадии развития агрофитоценоза [8].

Это подтверждается примерами успешного применения методов математического моделирования в анализе влияния климатических изменений на продуктивность локальных агроэкосистем, при сравнительном анализе в многолетнем разрезе эффективности мероприятий, направленных на поддержание плодородия и продуктивности сельскохозяйственного агроландшафта с учетом альтернативных схем севооборота, в том числе в рамках ограничений и технологий системы органического земледелия, а также для лучшего понимания взаимодействий в системе «Климат–Почва–Ризосфера–Растение», оценки отдельных компонентов системы, а также выявления микроорганизмов, потенциально перспективных в биотехнологии региона. При этом исследования геномов микробно-растительных взаимодействий могут оказать мощное стимулирующее влияние на развитие ряда областей фундаментальной и прикладной биологии и агротехнологии. Это проявляется в развитии уче-

ния о симбиозе сообществ микроорганизмов и агрокультурных растений, становлении новых направлений генетики, развитии прикладных генно-инженерных агротехнологий в растениеводческом секторе АПК [9].

Несмотря на разнообразие микробно-растительных взаимодействий, их характеризует историческая преемственность, позволяющая рассматривать разные формы симбиоза как компоненты единого эволюционного континуума. Данный исторический анализ взаимодействий необходим при изучении различного рода взаимоотношений между растениями и микроорганизмами. У ржи сообщества ризосферы в целом оказались несколько ближе к сообществам исходных почв, чем у пшеницы [10]. Микробиомы пшеницы в условиях аридного климата в различных исходных почвах и ризосферах сильно различались, т.е. показан выраженный ризосферный эффект в различных почвах. На формирование ризосферного сообщества существенно влияет как тип почвы, так и вид растения. Наиболее сильным фактором оказался тип почвы: и ризосферные сообщества, сформированные в различных типах почвы, и исходные почвенные сообщества достоверно отличаются друг от друга. Для различных почв показано сохранение этих различий при формировании разных ризосферных сообществ. Вид растения является вторым по значимости (после типа почвы) фактором, определяющим таксономический состав ризосферного микробиома. При этом методами метагеномики в ризосферном микробиоме зафиксированы представители многих видов и штаммов микроорганизмов, включая: *Arthrobacter castelli*, *Arthrobacter chlorophenolicus*, *Bacillus atrophaeus*, *Bacillus muralis*, *Bacillus simplex*, *Bacillus simplex*, *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Pseudomonas brassicacearum*, *Pseudomonas chlororaphis*, *Pseudomonas frederiksbergensis*, *Pseudomonas kilonensis*, *Sphingobacterium faecium*, *Stenotrophomonas rhizophila*, *Variovorax paradoxus* [11].

Моделирование продуктивности искусственной агроэкосистемы. В настоящее время осуществляется переход к моделированию продуктивности агрофитоценоза по принципу «от моделей посева – к моделям системы земледелия».

В связи с этим представляет интерес определение минимально достаточного набора исследуемых факторов, на основе системного анализа которых возможно удовлетворительно достоверное прогнозирование урожайности. В этой постановке задачи прогнозирования урожайности зависимая переменная является дихотомической или бинарной величиной, она принимает значения либо «единица», либо «ноль». Решение задачи прогнозирования имеет смысл в такой постановке, даже в случае неудачного решения. При этом целесообразно использовать нелинейную модель для описания математического ожидания вероятности, выражаемой бинарной переменной, представляемой интегральным показателем урожайности агрофитоценоза:

$$P(t) = F(\alpha + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik}), \quad (8)$$

где $F(\beta_i x_{ij})$ – функция распределения некоторой случайной величины, интегрально описывающей флуктуации гелиогеоклиматических факторов, t – время. При таком подходе не возникает трудностей с интерпретацией значений функции после подстановки в нее оценок неизвестных параметров и значений факторов, так как вычисленное значение представляет собой оценку вероятности при условии, что бинарная переменная равна единице.

В качестве функции можно использовать любую непрерывную функцию распределения, соответствующую симметричному распределению, однако на практике принято применять две функции распределения – как логистическую:

$$\Lambda(z) = \frac{\exp(z)}{1+\exp(z)} = \frac{1}{1+\exp(-z)}, \quad (9)$$

так и функцию стандартного нормального распределения:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (10).$$

где u – некоторая переменная, параметр или функция, а z – предел интегрирования.

Если на основе статистических исследований удастся построить модель, пригодную для прогнозирования, то можно провести ее математическую оптимизацию для определения чувствительности построенной модели по отношению к изменению исследуемых факторов.

Как правило, для признания адекватности модели в ней должно присутствовать следующее соответствие:

- 1) если бинарная переменная принимает значение 1, то модель должна давать вероятность больше 0,5;
- 2) при значении бинарной переменной 0, модель должна, как правило, давать вероятность меньше 0,5.

Если подобное соответствие при моделировании агрофитоценоза выполняется, это свидетельствует о том, что построенная модель пригодна для прогнозирования, а выбранный набор факторов может быть признан минимально достаточным для использования в целях дальнейших исследований *in silico*. Во всех иных случаях модель непригодна и наборы объясняющих факторов целесообразно изменить. Однако, как свидетельствует опыт симуляции *in silico*, даже в тех случаях, когда математическая и/или имитационная модель агрофитоценоза демонстрирует хорошие результаты при тестовых прогонах, необходимо предпринимать попытки уменьшения количества исследуемых факторов, используемых в процессе моделирования, с целью сокращения продолжительности необходимых расчетов, упрощения оценок неизвестных факторов и, наконец, построения новых более оптимальных и практичных моделей [7].

Моделирование зависимости экспорта и импорта пшеницы от факторов космической погоды. Как свидетельствует анализ мировой статистики в период с 2001 по 2014 год, объемы экспорта пшеницы в мире составили 1958,0 млн. т. В это же период основными странами-экспортерами пшеницы были США (387,5 млн. т), Канада (251,9 млн. т), Россия (166,0 млн. т), Франция (238,6 млн. т), Австралия (247,7 млн. т), Германия (95,2 млн. т), Украина (82,6 млн. т), Казахстан (583,4 млн. т) и Аргентина (107,9 млн. т). Вместе с тем, объем импорта пшеницы в период с 2001 по 2014 год в мире составил более 177,1 млн. т. В этот же период основными странами импортерами этой агрокультуры являлись Италия (95,9 млн. т), Алжир (84 млн. т), Мозамбик (8,9 млн. т), Бразилия (86,2 млн. т), Япония (78,3 млн. т) и Египет (73,3 млн. т.) [11]. На основании результатов предварительных исследований в качестве критериев оценки космической погоды были избраны такие показатели солнечной активности, как суммарное число пятен на солнечном диске – число Вольфа (W), показатели числа Вольфа северного (W_n) и южного (W_s) полушария солнечного диска, а также солнечные вспышки классов С, М и Х. Подчеркнем, что важным природным фактором, оказывающим влияние на урожайность агрокультур, является солнечная активность, которая может быть охарактеризована на основе показателей солнечных вспышек различных классов. Солнечная вспышка – взрывной процесс выделения кинетической, световой и тепловой энергии в различных слоях атмосферы Солнца. В частности, для солнечной вспышки класса С интенсивность энерговыделения в пике составляет от $1,0 \times 10^{-6}$ до 10^{-5} Вт/м², для вспышки класса М – от 10^{-5} до 10^{-4} Вт/м² и для вспышки класса Х – от 10^{-7} до 10^{-6} Вт/м². Энерговыделение мощной солнечной вспышки может достигать 6×10^{25} Джоулей, что составляет около 160 млрд мегатонн в тротиловом эквиваленте, что, для сравнения, составляет приблизительный объем мирового потребления электроэнергии за 1 миллион

лет. В последние годы часто используют классификацию, основанную на однородных измерениях амплитуды теплового рентгеновского всплеска в диапазоне энергий 0,5–10 кэВ, по данной классификации солнечной вспышке присваивается балл – обозначение из латинской буквы и индекса за ней. Буквой может быть А, В, С, М или Х в зависимости от величины достигнутого всплеском пика интенсивности рентгеновского излучения. Другим важным фактором, оказывающим существенное влияние на урожайность агрокультур и продуктивность агрофитоценозов, являются геомагнитные бури, которые рассматриваются возмущения геомагнитного поля длительностью от нескольких часов до нескольких суток, оцениваемые по шкале G-индекса [11, 12].

Наблюдаемые в настоящее время погодные флуктуации в значительной степени коррелируют с динамикой гелиофизических показателей солнечной активности, которые также оказывают существенное влияние на состояние геомагнитного поля и магнитосферы Земли и, как следствие, на климатические флуктуации на нашей планете. Широко известными маркерами гелиофизических процессов и солнечной активности вообще являются солнечные пятна, а 11-летний солнечный цикл – самый известный квазипериодический феномен на Солнце и, возможно, в астрофизике вообще.

В работе О.В. Пономарёвой [13] определена ответственность планет земной группы за изменение числа солнечных пятен с периодами: $T = 11,083$ лет; $T = 8$ лет; $T = 6,78$ лет; $T = 1,61$ лет, которые, по утверждению автора, можно считать универсальными гелиофизическими константами. Их влияние на земные процессы происходит по «каналам обратной связи», т.е. планеты – Солнце – Земля. Кроме того, Юпитер в составе планет-гигантов ответственен за «долгопериодные» циклы солнечной активности, кратные среднему периоду $T = 11,85$ лет. Кроме того, необходимо отметить возможность влияния гравитационных волн, излучаемых барицентрами планетных групп Солнечной системы, на изменение формы Земли; что, в свою очередь, связано с вариациями гравитационной постоянной и геодинамическими показателями: периодическим движением полюса Земли, вариациями длительности суток и сейсмической активностью Земли.

На рисунках 1 и 2 представлены результаты динамики геомагнитных бурь в период с 2000 по 2001 гг., а также с 2010 по 2018 гг. Анализ трендов свидетельствует о том, что в период с 2000 по 2009 гг. отмечена тенденция к снижению мощности геомагнитных бурь, о чем свидетельствует отрицательное значение первого члена в уравнении полиномиальной функции 6-й степени, с помощью которой осуществлялась аппроксимация. Тогда как в период с 2010 по 2018 гг. отмечена тенденция к постепенному возрастанию мощности геомагнитных бурь, на что указывает знак при первом члене уравнения функции аппроксимации.

На рисунках 3 и 4 представлена динамика, а также результаты линейной, степенной и экспоненциальной аппроксимации экспорта пшеницы в мире за период с 2010 по 2018 гг. и его прогнозные тренды на период до 2024 г. Рассмотрена текущая динамика и построены прогностические тренды экспорта пшеницы пятью ведущими странами импортерами – Австралией, Канадой, Россией, США, Францией за тот же период.

На рисунках 5 и 6 представлены показатели импорта пшеницы шестью крупнейшими странами-импортерами этой агрокультуры в мире – Алжиром, Бразилией, Египтом, Италией, Мозамбиком и Японией.

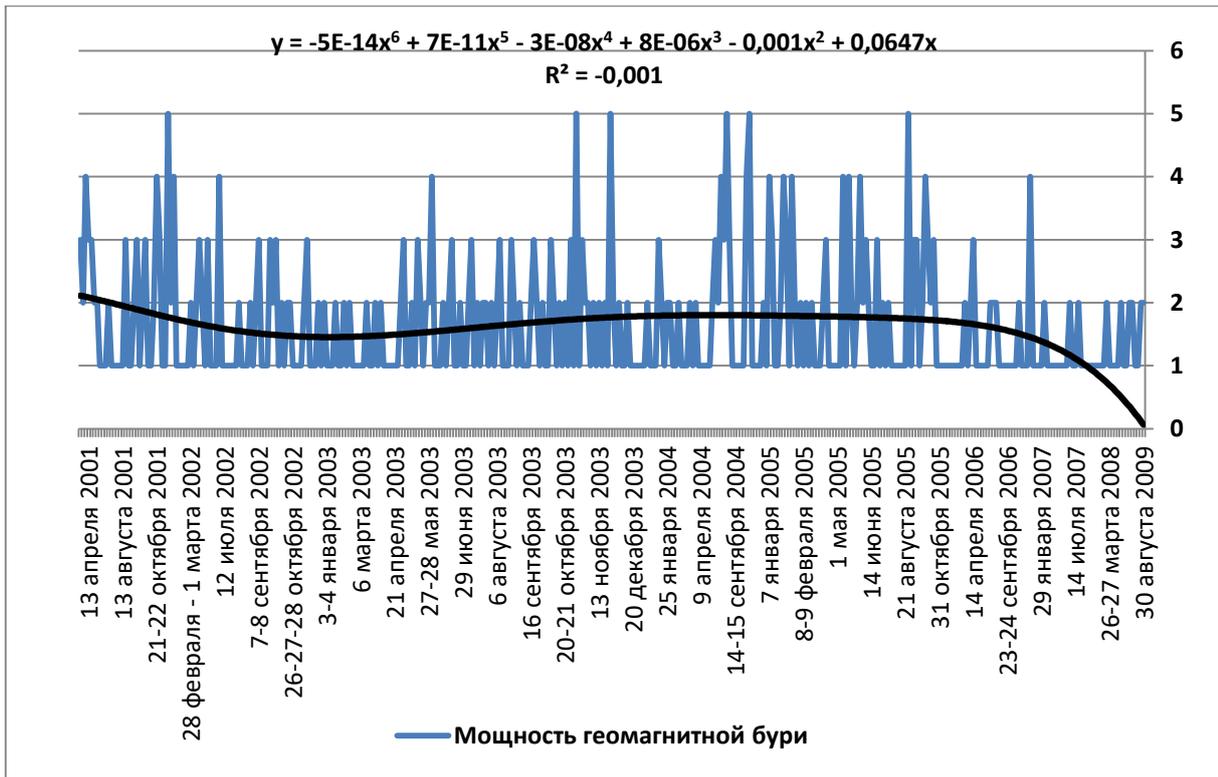


Рисунок 1. Характеристика мощности геомагнитных бурь по показателю G-индекса в период с 2001 по 2009 гг.

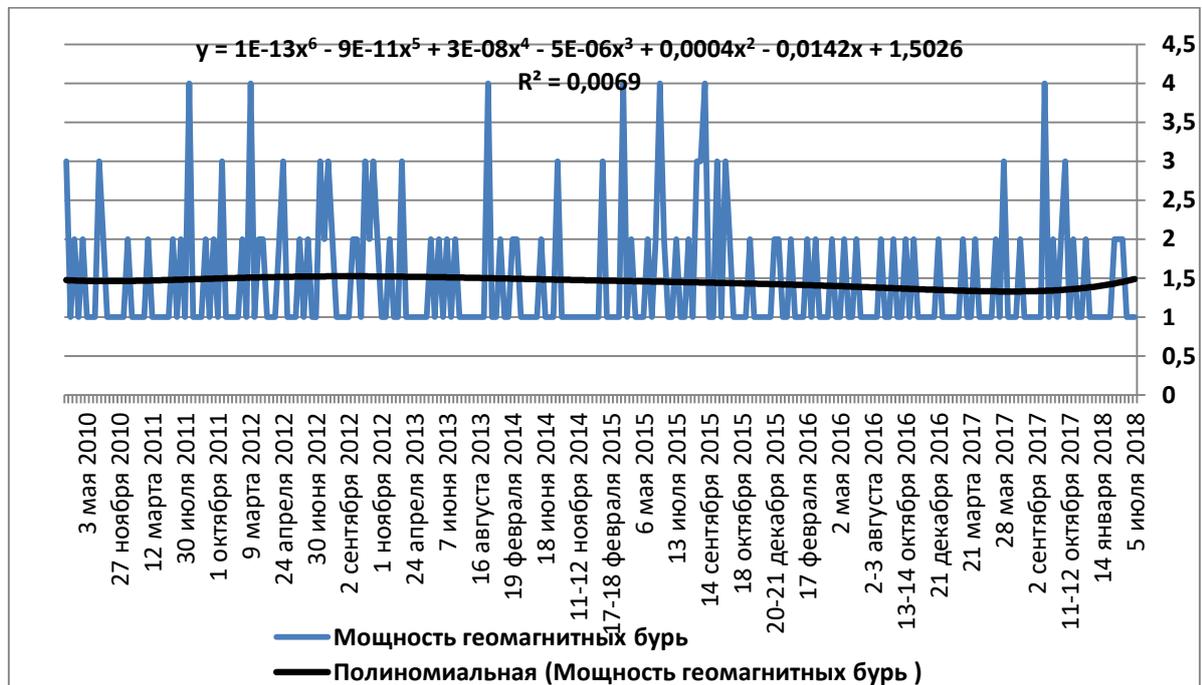


Рисунок 2. Характеристика мощности геомагнитных бурь по показателю G-индекса в период с 2010 по 2018 гг.

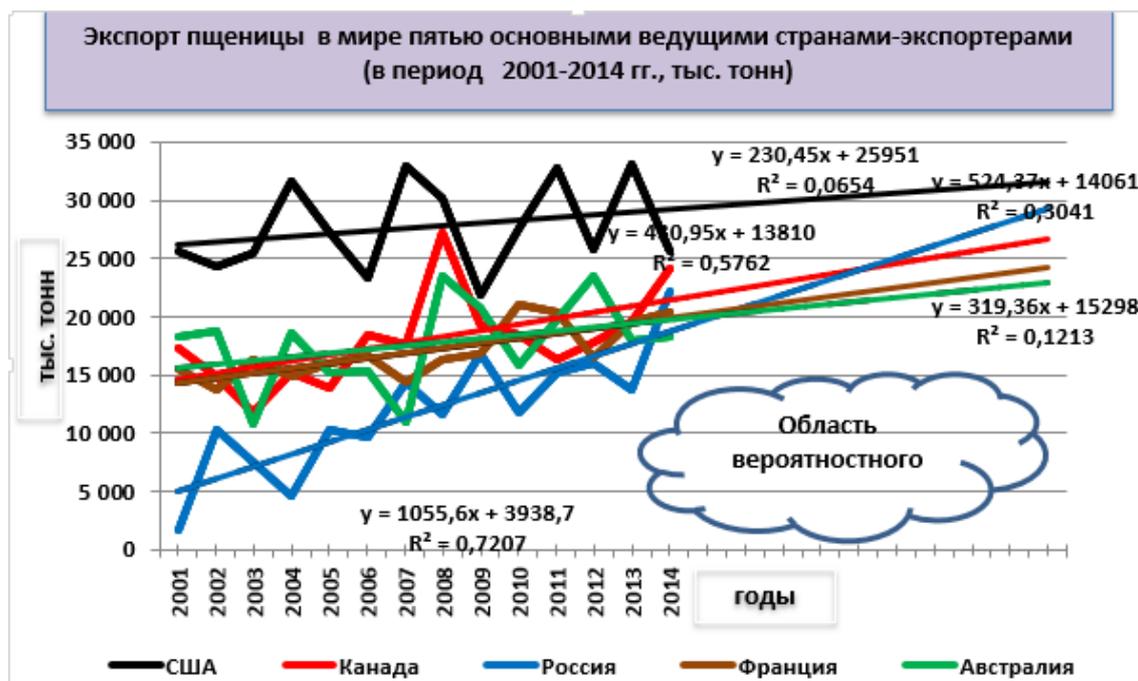


Рисунок 3. Динамика экспорта пшеницы шестью ведущим и странами-импортерами в период с 2010 по 2018 гг. и его прогнозные линейные тренды на период до 2024 г.

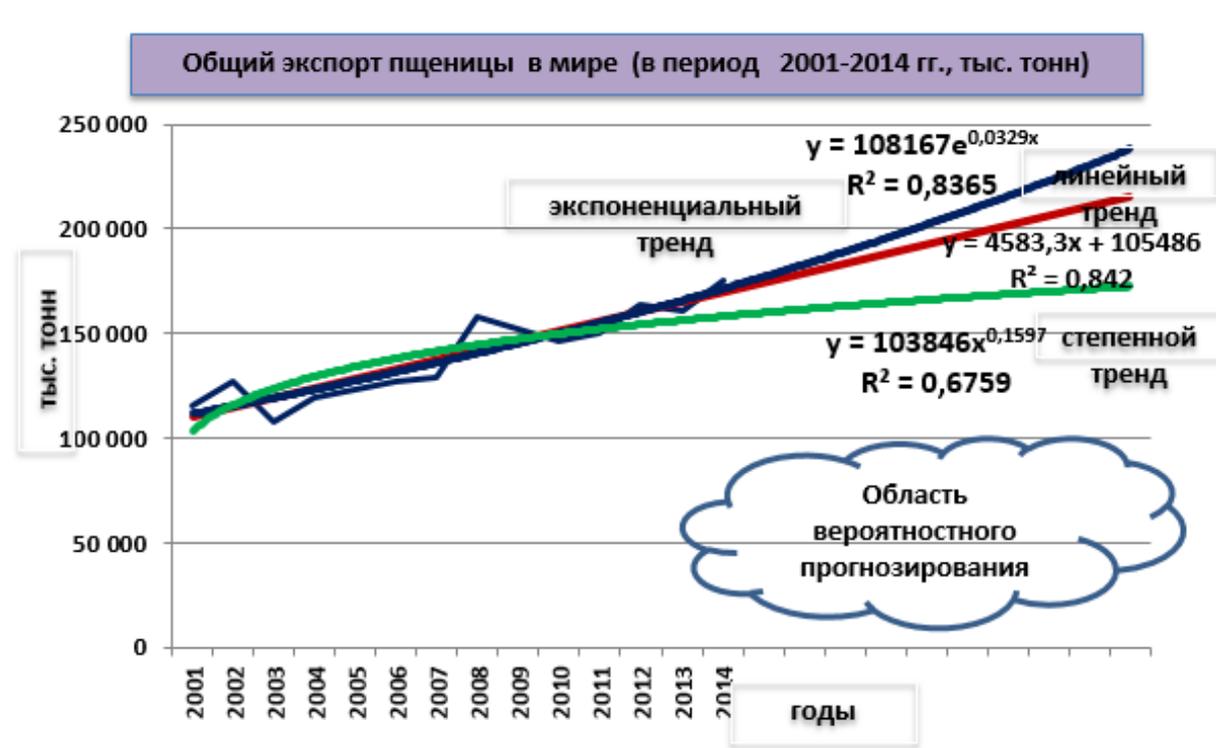


Рисунок 4. Линейная, степенная и экспоненциальная аппроксимация экспорта пшеницы в мире за период с 2010 по 2018 гг. и его прогнозные тренды на период до 2024 г.

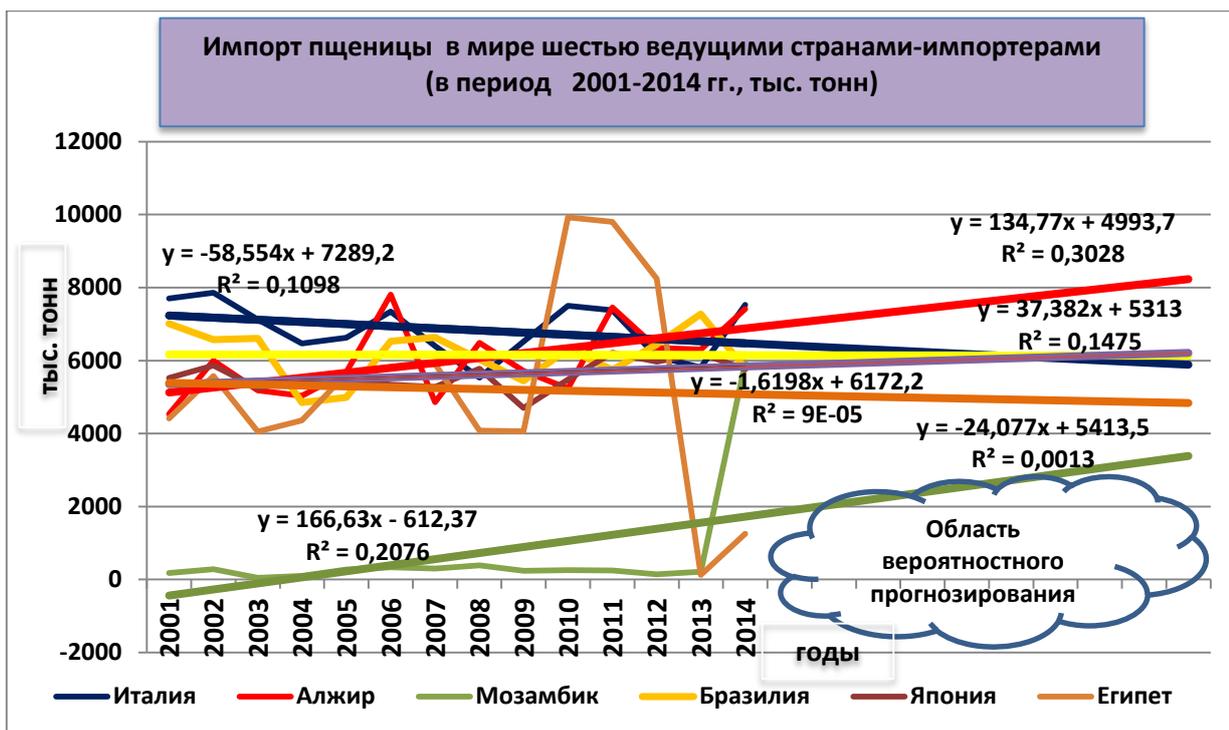


Рисунок 5. Динамика импорта пшеницы шестью ведущим и странами-импортерами в период с 2010 по 2018 гг. и его прогнозные линейные тренды на период до 2024 г.

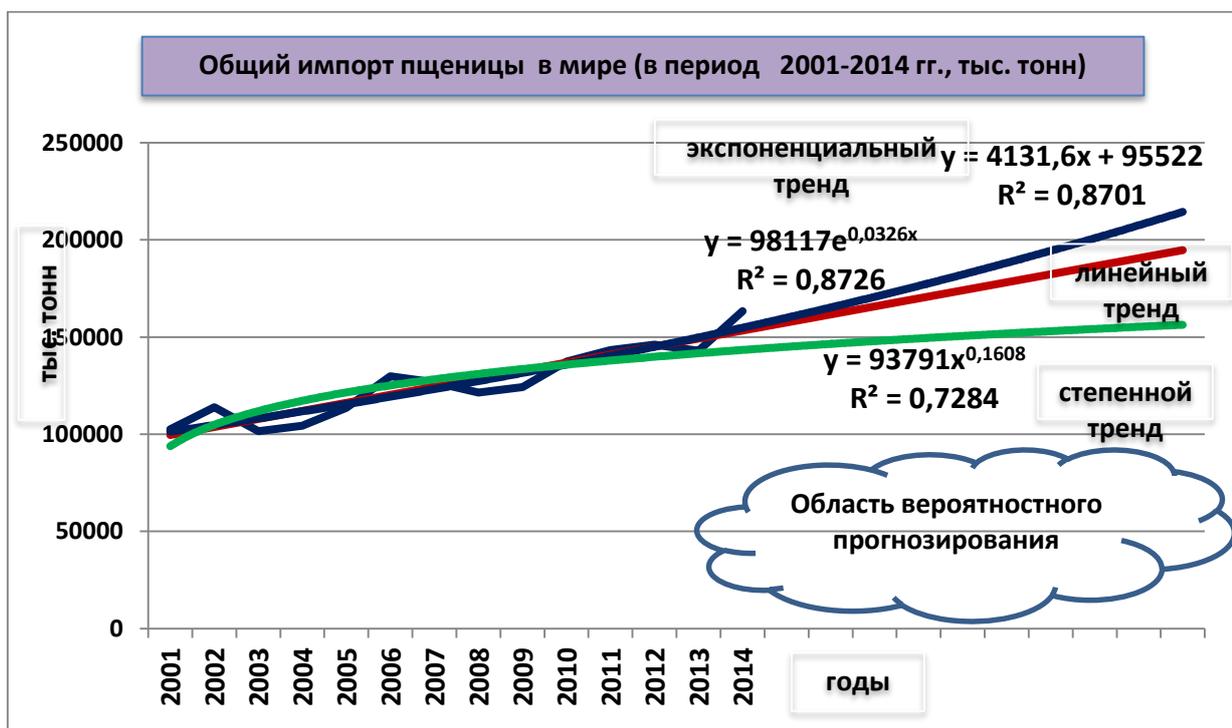


Рисунок 6. Линейная, степенная и экспоненциальная аппроксимация импорта пшеницы в мире за период с 2010 по 2018 гг. и его прогнозные тренды на период до 2024 г.

Отмечена тенденция к увеличению объемов экспорта пшеницы основными странами-экспортерами, такими как Австралия, Канада, Россия, США и Франция. Также отмечена

тенденция к увеличению объемов импорта пшеницы традиционно ведущими странами-импортерами, таким как Алжир, Египет и Мозамбик. Из них Алжир и Египет, а также ряд других, менее значительных импортеров зерна, находятся в зоне жаркого аридного климата. Необходимо отметить то, что прогнозные тренды экспорта и импорта пшеницы характеризуются положительной корреляцией с трендом возрастания геомагнитной активности Земли.

На основе результатов множественного корреляционного и регрессионного анализа были получены математические модели на основе уравнений множественной линейной регрессии, характеризующие зависимость объемов экспорта или импорта пшеницы от выше-названных гелиофизических и геофизических характеристик.

В дальнейшем собраны и систематизированы данные о динамике наблюдаемых показателей солнечной активности, включая три числа Вольфа W , W_n и W_s , а также количество вспышек классов C , M и X . Кроме того, проанализированы показатели динамики геомагнитных бурь (ГМБ) на нашей планете за этот же период.

В частности, получено 234 уравнения линейной регрессии экспорта пшеницы основными странами-экспортерами в период с 2001 по 2014 гг. В качестве примера ниже представлены наиболее простые и доступные для интерпретации регрессионные модели экспорта (11 – 17) и импорта (18 – 24) пшеницы.

$$[\text{Весь мир}] = -79,32W - 71,4M - 27,92X + 6023,23\text{ГМБ}, \quad (11)$$
$$R^2 = 0,926, F = 0,0304;$$

$$[\text{США}] = -26,4W - 2,64M - 58,8X + 1284,5\text{ГМБ}, \quad (12)$$
$$R^2 = 0,868, F = 0,078;$$

$$[\text{Канада}] = -21,4W - 15,6M - 19,3X + 904,3\text{ГМБ}, \quad (13)$$
$$R^2 = 0,916, F = 0,039;$$

$$[\text{Россия}] = -41,6W + 3,4M - 59,3X + 474,7\text{ГМБ}, \quad (14)$$
$$R^2 = 0,734, F = 0,215;$$

$$[\text{Франция}] = 4,2W - 18,4M + 121,4X + 679,3\text{ГМБ}, \quad (14)$$
$$R^2 = 0,9347, F = 0,269;$$

$$[\text{Австралия}] = 7,96W - 9,65M - 47,78X + 796,2\text{ГМБ}, \quad (15)$$
$$R^2 = 0,928, F = 0,031;$$

$$[\text{Германия}] = -9,64W - 6,7M - 13,4X + 246,2\text{ГМБ}, \quad (16)$$
$$R^2 = 0,89, F = 0,0587;$$

$$[\text{Украина}] = 0,9892W - 5,26M - 14,39X + 230,45\text{ГМБ}, \quad (17)$$
$$R^2 = 0,71, F = 0,247;$$

Также были получены уравнения линейной регрессии импорта пшеницы основными странами-импортерами в период с 2001 по 2014 гг.:

$$[\text{Весь мир}] = -74,1W - 80,3M + 167,8X + 5430,6\text{ГМБ}, \quad (18)$$
$$R^2 = 0,916, F = 0,039;$$

$$[\text{Италия}] = 13,447W - 4,39M + 19,331X + 269,6\text{ГМБ}, \quad (19)$$
$$R^2 = 0,945, F = 0,021;$$

$$[\text{Алжир}] = -5,6W - 6,2M + 27,99X + 279,6\text{ГМБ}, \quad (20)$$
$$R^2 = 0,91, F = 0,044;$$

$$[\text{Мозамбик}] = -41,6W + 3,4M - 59,3X + 474,7\text{ГМБ}, \quad (21)$$
$$R^2 = 0,799, F = 0,143;$$

$$[\text{Бразилия}] = 4,2W - 18,4M + 121,4X + 679,3\text{ГМБ}, \quad (22)$$
$$R^2 = 0,897, F = 0,053;$$

$$[\text{Япония}] = 7,96W - 9,65M - 47,78X + 796,2\text{ГМБ}, \quad (23)$$
$$R^2 = 0,938, F = 0,025;$$

$$[\text{Египет}] = -9,64W - 6,7M - 13,4X + 246,2\text{ГМБ}, \quad (24)$$
$$R^2 = 0,91, F = 0,043.$$

Необходимо отметить, что вышеназванные множественные регрессионные модели были исследованы на наличие мультиколлинеарности, автокорреляции остатков и гетероскедастичности. Для каждого уравнения линейной регрессии представлены показатели R^2 и F , которые позволяют оценить степень надежности и достоверности регрессионной модели.

Заключение

1) Показана тенденция к увеличению объемов экспорта пшеницы в мире на период до 2024 года. Также отмечена тенденция к увеличению объемов импорта пшеницы традиционно ведущими странами-импортерами, таким как Алжир, Египет и Мозамбик. Необходимо отметить, что географически Алжир, Египет и многие другие, менее значительные импортеры зерна, располагаются в зоне жаркого аридного климата. Показано, что прогнозные тренды экспорта и импорта пшеницы положительно коррелируют с трендом некоторого возрастания частоты и интенсивности геомагнитных бурь на поверхности Земли в первой четверти XXI столетия. Возможно, подобная ситуация обусловлена ослаблением магнитного поля Земли и возрастанием ее уязвимости для потоков корпускулярного излучения Солнца.

2) Разработаны математические модели, представленные уравнениями множественной линейной регрессии для динамики объемов экспорта и импорта пшеницы в мире на основе учета факторов солнечной и геомагнитной активности. В частности, разработаны регрессионные модели экспорта ведущими странами-экспортерами пшеницы (Австралия, Германия, Канада, Россия, США, Украина, Франция). Разработаны регрессионные модели импорта пшеницы основными странами импортерами (Алжир, Бразилия, Египет, Италия, Мозамбик, Япония). Анализ уравнений моделей линейной регрессии указывает на наличие связей между суммарным числом Вольфа (W), количеством солнечных вспышек класса X и интенсивностью геомагнитных бурь, с одной стороны, и объемами экспорта и импорта пшеницы, с другой стороны, в период с 2001 по 2014 гг.

3) Вместе с тем, как свидетельствуют результаты множественного корреляционного анализа (данные не приведены), показатели суммарного числа Вольфа (W), солнечных вспышек классов M и X , а также интенсивности геомагнитных бурь оказывают значительное и согласованное влияние на объемы импорта пшеницы в период с 2001 по 2014 гг. Отмечена вариабельность влияния исследуемых гелио- и геофизических факторов на объемы экспорта и импорта пшеницы для различных стран, отличающихся географическим положением, расположением основных сельскохозяйственных угодий в различных полушариях и на разных географических широтах. Статистический анализ вероятностного распределения крупных солнечных вспышек и геомагнитных бурь предоставляет возможность раннего прогноза вариаций температуры приземного воздуха и интенсивности осадков в интервале 2–5,5 лет. Для статистики таких событий внутри 11-летнего цикла можно оценочно считать, что между максимумами значимых солнечных вспышек проходит 2–4 года, тогда как для геомагнитных бурь этот период шире и составляет от 2 до 6 лет [14].

4) В настоящее время одним из перспективных направлений в области системного анализа и математического моделирования сложных антропогенных экосферных систем является прогнозирование продуктивности агрофитоценозов с учетом гелиофизических и геофизических факторов. К таковым относятся показатели солнечной активности, включая динамику «числа Вольфа» (общее количество пятен на солнечном диске, а также их число в северной и южной областях солнечного диска в отдельности), а также параметры корпускулярного излучения Солнца – «солнечного ветра», интенсивности его радиоизлучения, количество и мощность геомагнитных бурь и флуктуаций магнитосферы Земли [12, 13].

5) Принимая во внимание многофакторность, масштабность, продолжительность во времени, большие объемы потоков данных о состоянии агрофизических, агротехнологических, биоэкологических, гелиофизических, геофизических, климатических процессов, а также результаты исследований метагеномов ризосферных микробных сообществ в почве агрофитоценоза, целесообразно отметить, что развитие технологий моделирования, прогнозирования и превентивного управления урожайностью агрофитоценозов является трансдисциплинарной проблемой и требует использования научных подходов, методов и инженерно-технологических решений в области Big Data и Deep Learning.

6) Разработаны элементы методологии геоагробιοинформатики как интегрального научно-практического направления, которое синтетически обобщает знаний из агрофизики, биофизики, гелиобиологии, географии, геоэкономики, климатологии, агротехнологии, биоэкологии, ландшафтоведения, системного анализа, математического моделирования, компьютерных наук, теоретической и прикладной информатики на основе трансдисциплинарного подхода. Геоагробιοинформатика является одной из областей применения технологий Big Data и Deep Learning для агрегации и обработки больших потоков многофакторных данных о состоянии агрофизических, агротехнологических, биоэкологических, гелиофизических, геофизических, климатических процессов, а также результатов исследований метагеномов ризосферных микробных сообществ в почве в условиях аридного климата и погодноклиматических флуктуаций.

Таким образом, геоагробιοинформатика является интегративным методологическим фундаментом для развития методов моделирования и прогнозирования продуктивности агрофитоэкологических систем и комплексного развития цифровых агротехнологий XXI века.

Литература

- [1]. Полуэктов Р.А. и др. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2006. – 396 с.
- [2]. Математические модели природных и антропогенных экосистем : Сборник статей, посвященный памяти Ратмира Александровича Полуэктова. – СПб. : АФИ, 2014. – 191 с.
- [3]. Интернет вещей в сельском хозяйстве (Agriculture IoT / AIoT) : мировой опыт, кейсы применения и экономический эффект от внедрения в РФ. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/internet-veschey-v-selskom-hozyaystve-agriculture-iot-aiot-mirovoy-opyt-keysy-primeneniya-i-ekonomicheskiy-effekt-ot-vnedreniya-v-rf-20170621045316 Дата доступа: 21.08.2017.
- [4]. Чичагов, В.П. Аридные равнины северо-запада Африки: особенности структуры, скульптуры, истории формирования / В.П. Чичагов. – М. : Институт географии РАН, Геоморфологическая комиссия, 2008. – 176 с.
- [5]. Чичагов, В.П. История сезонно-засушливых равнин тропиков Юго-Восточной Азии / В.П. Чичагов. – М. : Институт географии РАН, 2009. – 152 с.
- [6]. Peel, M. C. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification / M.C. Peel, B.L. Finlayson, T.A. McMahon // Hydrology and Earth System Sciences. – 2007. – Vol. 11. – P. 1633–1644.
- [7]. Буре, В.М. Методология статистического анализа опытных данных / В.М. Буре. – СПб. : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2007. – 141 с.
- [8]. Фурсова, П.В. Экстремальные принципы в математической биологии / П.В. Фурсова, А.П. Левич, В.Л. Алексеев // Успехи современной биологии. – 2003. – Том 123, № 2. – С.115–137.
- [9]. Тихонович, И.А. Симбиозы растений и микроорганизмов: молекулярная генетика агросистем будущего / И.А. Тихонович, Н.А. Проворов. – СПб, 2009. – 210 с.
- [10]. Donn, S. Evolution of bacterial communities in the wheat crop rhizosphere / S. Donn, J.A. Kirkegaard, G. Perera, A.E. Richardson, M. Watt // Environ. Microbiol. – 2015. – N3. – P. 610–621.
- [11]. Страны-экспортеры пшеницы, страны-импортеры пшеницы. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ab-centre.ru/page/strany-eksportery-pshenicy-strany-importery-pshenicy>. – Дата доступа: 12.12.2018.
- [12]. Ермолаев, Ю.И. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды / Ю.И. Ермолаев, М.Ю. Ермолаев // Геофизические процессы и биосфера. – 2009. – Т.8, N1. – С. 5–35.
- [13]. Пономарёва, О.В. Связь вариаций гравитационной постоянной с некоторыми геодинамическими показателями. Роль планет и планетных групп в активности Солнца / О.В. Пономарёва // Труды региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский : ГС РАН. – 2008. – Т.2. – С. 212–216.

[14]. Тихонов, В.Е. Долгосрочное прогнозирование урожайности в степной зоне Урала на основе современных методов оценки солнечно-земных связей 2014 г. / В.Е. Тихонов, А.А. Неверов // Аридные экосистемы. – 2014. – Т. 20, N 4 (61). – С. 86–92.

MODELING OF PRODUCTIVITY OF AGROPHYTOCENOSIS IN THE CONDITIONS OF CLIMATIC FLUCTUATIONS AS A BIG DATA PROBLEM

A.G. DAVIDOVSKY

*PhD (Candidate of Biological Sciences), Associate Professor,
Associate Professor of Engineering Psychology and Ergonomics Department of the Faculty of Computer Design
of Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics*

D.V. LIKHACHEVSKY

*PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor
Dean of the Faculty of Computer-Aided Design of the Belarussian state University
of Informatics and Radioelectronics*

*Belarussian state University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
E-mail: agd2011@list.ru; likhachevskyd@bsuir.by*

Abstract. The problems of mathematical modeling of productivity of agrophytocenoses in arid climate and weather-climatic fluctuations are considered. Regression mathematical models describing the dynamics of wheat export and import in the period from 2000 to 2014 were developed and analyzed. The fundamentals of the methodology of Geo-Agro-Bio-Informatics as a new field of fundamental and applied research to improve the productivity of agrophytocenoses are presented.

Keywords: mathematical modeling, agrophytocenosis, arid climate, weather-climatic fluctuations.