

Бусько Е.Г.

## ТРАНСФОРМАЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОЙ СРЕДЫ

**Введение.** Интенсивное развитие промышленного производства в Белоруссии в последние десятилетия вызвало существенные изменения в состоянии окружающей среды, что в известной мере привело к нарушению экологического равновесия в природных комплексах, в том числе в лесных экосистемах.

Поскольку лес является основным аккумулятором и трансформатором солнечной радиации в биотическом и энергетическом потоке биосферы и главнейшим продуцентом органического вещества, а также выполняет климатообразующую, водоохранную и противозерозионную функции, то представляется целесообразным определить характер и степень его ответной реакции на воздействие техногенных и рекреационных нагрузок, способствующих ухудшению лесорастительных условий.

Особенности географического положения Беларуси обусловили резкое преобладание в составе атмосферных выпадений трансграничной составляющей. По последним оценкам центров ЕМЕП, доля трансграничной серы в выпадениях на территорию Беларуси составила 86%, окисленного азота – 93, восстановленного азота – 59, бензо(а)пирена – 68%. Около 70% антропогенного свинца, 80% кадмия и ртути также имеют внешнее происхождение. В поступлении на территорию Беларуси окисленных серы и азота, тяжелых металлов, бензо(а)пирена основной вклад принадлежит странам-соседям: Польше, Германии, Украине, России (табл. 1). Восстановленный азот имеет в основном местное происхождение; существенный вклад вносят также Украина и Польша. В свою очередь, более 60% серы и восстановленного азота и около 90% окисленного азота от источников на территории Беларуси выпадает на территорию других стран.

Информацию о выпадениях серы и азота на территории Беларуси, дополняющую оценки по моделям переноса и осаждения, позволяют получить данные сети мониторинга химического состава атмо-

сферных осадков в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС). Интенсивность потока осаждения с атмосферными осадками рассчитывалась как функция взвешенной средней годовой концентрации серы и азота в осадках на основе данных о месячных концентрациях компонентов в осадках определенной станции и годового количества осадков [1, 2].

Такие расчеты выполняются в рамках Совместной программы наблюдений и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих веществ в Европе (ЕМЕП) метеорологическими синтезирующими центрами «Восток» и «Запад» (МСЦ-В и МСЦ-З). Наиболее отработанным расчет трансграничного переноса и выпадений соединений серы и азота, являющихся основными по своей масштабности закислителями природной среды. [1, 2].

В предыдущих наших работах [3, 4, 5] было установлено, что, несмотря на выраженные различия химического состава химических поллютантов, их количества и путей поступления при различной специфике и технологии производств, практически на всех стационарах, расположенных в зоне функционирования промышленных объектов, было установлено присутствие в составе техногенных эмиссий общих ингредиентов: тяжелых металлов, кремнезема, соединений серы, азота и ряда других. Это позволило изначально предположить наличие общих черт в характере их воздействия на основные компоненты лесных экосистем – ассимилирующие органы, опад, лесную подстилку и почвы.

**Объекты и методы исследования.** Для объективной оценки экологической ситуации, сложившейся в республике под воздействием техногенных факторов, представляется необходимым вычленив из широкого спектра элементов, входящих в промышленные эмиссии, те элементы, которые оказывают наибольшее влияние на

**Таблица 1.** Выпадения некоторых тяжелых металлов и СОЗ на территорию Беларуси от источников в других странах в 2005 г., кг/год

Страна-источник	Свинец	Кадмий	Ртуть	Бензо(а)-пирен	ПХДД, гЭТ
Беларусь	18518,0	785,70	144,10	3980,0,0	24,67
Польша	17210,0	1827,30	294,20	940,70	9,88
Украина	6473,0	72,22	69,76	1228,00	20,89
Россия	3429,0	771,90	62,37	77,81	3,54
Румыния	3360,0	36,69	17,08	71,37	0,43
Словакия	1610,0	112,20	20,02	42,45	0,66
Сербия и Черногория	1320,0	58,20	10,92	14,66	0,31
Греция	1171,0	6,98	9,68	4,33	0,17
Турция	1169,0	34,16	12,99	40,86	1,39
Болгария	924,3	90,04	6,76	11,13	0,42
Чехия	849,0	58,51	20,71	54,48	1,09
Италия	808,1	20,50	8,87	18,05	0,32
Германия	762,1	18,74	5,43	99,69	0,20
Казахстан	687,5	12,59	10,84	2,08	0,04
Эстония	660,5	10,28	4,02	40,27	0,05
Латвия	555,7	19,04	1,15	313,60	0,69
Венгрия	548,3	23,03	17,4	31,67	0,41
Литва	531,0	18,39	10,52	214,70	0,95
Босния и Герцеговина	408,6	9,21	3,57	5,07	0,09
Прочие	3060,5	165,92	44,91	1441,08	57,40
Всего	64055,6	4151,60	775,30	8632,00	123,60

Бусько Е.Г., д.б.н. профессор УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». Беларусь, БГАТУ, 220023, г. Минск, пр-т Независимости, 99/1.

обменные процессы в лесных экосистемах. С этой целью минеральный состав указанных компонентов, как и в более ранних наших исследованиях оценивался по 21 показателю.

Оценка уровня загрязнения природной среды Беларуси промышленными токсикантами в целом и, на ее основе – выбор стационаров для проведения постоянных исследований были проведены путем проведения предварительных биоиндикационных исследований лесной растительности в 590 пунктах отбора растительных образцов в соответствии с общеевропейской методикой. Концентрация тяжелых металлов (Pb, Cd, Ni, Cr, Sr, Cu, Zn, Mn, Co) и ряда других химических элементов определена на плазменном спектрометре «Spektroflame» (Германия).

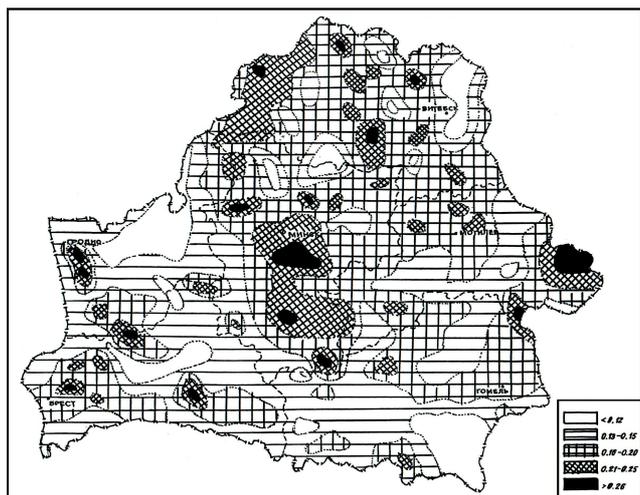


Рис. 1. Валовое содержание общей серы в лишайнике *Hypogymnia physodes* на территории Беларуси, %

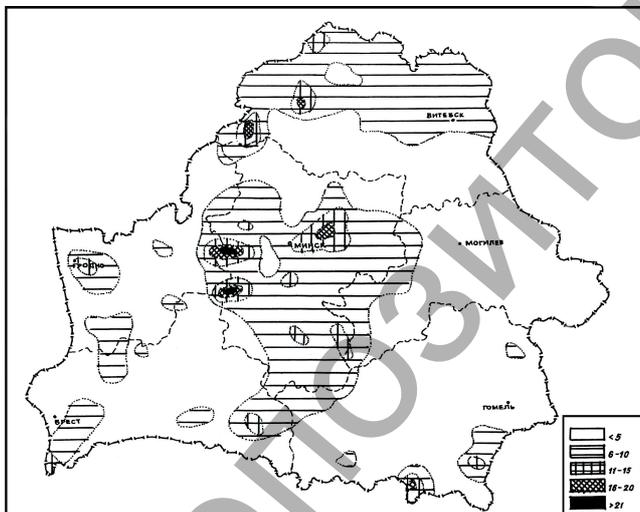


Рис. 2. Валовое содержание хрома в лишайнике *Hypogymnia physodes* на территории Беларуси, мкг/г

На основе выполненных карт-схем по каждому химическому элементу, установлено, что очаги повышенного накопления тяжелых металлов в тест-объектах локализованы на незначительной площади, а основная часть страны характеризуется либо фоновым, либо несколько превышающим его уровнем загрязнения (рис. 1–3).

Исходя из обзора принципов и методов фитоиндикации при проведении биологического мониторинга техногенного воздействия на природные экосистемы, мы остановили свой выбор на изучении ответной реакции на его проявления у сосновых фитоценозов, образованных основной для нашей страны лесообразующей породой.

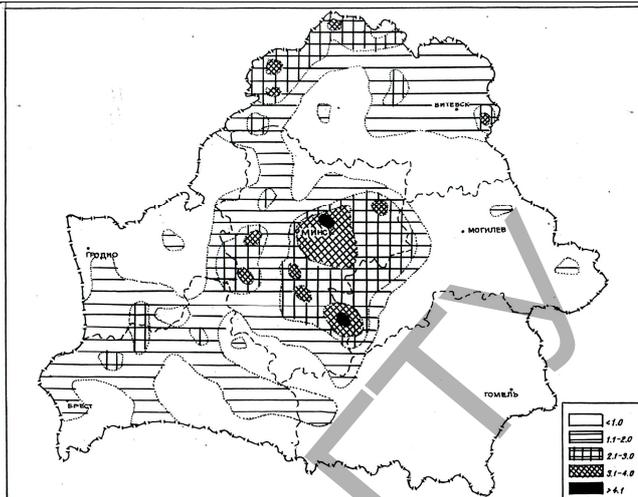


Рис. 3. Валовое содержание кадмия в лишайнике *Hypogymnia physodes* на территории Беларуси, мкг/г

Исследования были выполнены в лесных насаждениях, сформированных главной для Белоруссии лесообразующей породой – сосной обыкновенной, и занимающих в настоящее время 51,6 % ее лесопокрытой площади.

С целью получения наиболее полного представления о характере изменений отдельных структурных компонентов сосновых фитоценозов в условиях промышленной среды на территории Белоруссии была установлена серия стационаров в насаждениях, граничащих с наиболее крупными промышленными объектами, поставляющими в атмосферу разнообразные поллютанты, и соответственно – серия аналогичных стационаров, расположенных на сопредельной территории, но находящихся на достаточном удалении от промышленных объектов – в условиях биосферных заповедников.

Это обеспечивало, с одной стороны, наиболее широкий охват исследованиями пространства страны с учетом вариабельности ее почвенно-климатических характеристик, с другой – позволяло выявить степень отклонений от нормы изучаемых показателей, в зависимости от специфики техногенного загрязнения конкретных промышленных предприятий.

Исследования были проведены в двух сериях (находящихся в условиях промышленной среды и заповедных) сосновых фитоценозов, функционирующих вблизи шести областных центров страны, а также городов Новополоцка, Мозыря (с развитой нефтехимической промышленностью) и Новолукмля (ГРЭС).

С целью получения сравнительных показателей были установлены с соблюдением принципа адекватности стационарные контрольные пробные площади на значительном удалении от источников промышленных выбросов, то есть на расстоянии не менее 90 км. Для северной части Белоруссии контролем служили пробные площади, отведенные в сосняках на территории Березинского биосферного заповедника, для центральной – на территории Налибокской пуши, для западной части республики – на территории Национального парка «Беловежская пушча», а для восточной и юго-восточной частей – в сосняках Октябрьского лесхоза и Национального парка «Припятский» (Гомельская область).

Всего на всех исследуемых объектах была установлена 41 постоянная пробная площадь, в том числе в контрольных условиях – 11 (рис. 4, 5, 6).



$Mg > Ca = P = Al = Fe = B > S = Mn = Zn = Ni = Cr = Pb = Mo$

Таким образом, нами было установлено, что наибольших размеров комплексное усиление аккумуляции химических элементов достигло в сосновых фитоценозах Минского и Гродненского стационаров, наименьших – Новолукмльского, при следующей последовательности стационаров в ряду ослабления данной тенденции:

Минский > Гродненский > Брестский = Витебский > Мозырский=Могилевский> Гомельский = Новополоцкий > Новолукмльский

Наиболее активное вымывание самых подвижных мигрантов наблюдалось в условиях Гомельского и Мозырского стационаров, наиболее слабое – Минского, Гродненского и Витебского, при следующей последовательности стационаров в ряду ослабления данной тенденции:

Гомельский >Мозырский>Могилевский>Новолукмльский >

> Новополоцкий = Брестский > Минский = Гродненский = Витебский

При усреднении данных показателей (в расчете на количество участвующих в анализе компонентов) были построены ряды наиболее аккумулируемых и соответственно выщелачиваемых из экосистем региона элементов в порядке ослабления данных тенденций:

1)  $Ni > Na > S > Pb > Fe > Zn = Sr > Cr = Co > Ca > Cu > N - Si = Mg = Mn = Mo > B > K > Al > P$ ;

2)  $Mg > K > Cr > P > B > Zn > Mn = Co = Mo > Al > Fe = Ca > Si > Na = Ni = Pb = Sr > S = Cu$ .

Таким образом, наибольшим уровнем аккумуляции в них обладали *Ni, Na, S, Pb* и *Fe*, наиболее высокой миграционной способностью — *Mg, K, Cr, P* и *B*. Вместе с тем, в силу специфики состава и интенсивности воздействия техногенных поллютантов, каждому стационару была свойственна индивидуальная интегральная реакция экосистем на уровень загрязнения, проявлявшаяся прежде всего, в различной степени участия тех или иных элементов в трансформации химического состава рассматриваемых компонентов.

Таким образом, из всего спектра изучавшихся 21 элемента, повсеместным усилением накопления в ассимилирующих органах сосны, превышающим более чем на 30% контрольные значения, характеризовался *Cd*. Менее распространенный, но столь же отчетливый характер, носило накопление *Si, Mg, Cr, Co* и *Na*, и весьма ограниченный, проявлявшийся на отдельных стационарах – *S, Ni, Pb, K, B, Cu, Zn, Sr, N, Ca* и *Fe*.

**Заключение.** Исследование интегрального уровня воздействия техногенных поллютантов на изученный комплекс компонентов лесных экосистем Беларуси – хвою, опад, лесную подстилку и почвы показало, что на фоне различий глубины трансформации их химического состава в отдельных частях страны установлено выраженное усиление аккумуляции в них относительно заповедной территории *Ni, Na, S, Pb* и *Fe*, наиболее проявившееся на Минском и Гродненском стационарах, при параллельном повышении миграционной способности *Mg, K, Cr, P* и *B*, особенно в условиях Гомельского и Мозырского стационаров.

К числу элементов, обнаруживших одновременное усиление аккумуляции в большинстве компонентов лесных экосистем, следует отнести на Минском стационаре – *Si, Ca, S, Na, Zn, Co*; Гродненском – *Mg, S, Na, Ni*; Мозырском – *Cu, Ni, Cr, Pb*; Могилевском – *Fe, S, Ni, Co*; Брестском – *Ni, Pb, Sr*; Витебском – *Ca, Ni, Na*; Гомельском – *S, Na, Pb*; Новополоцком – *S, Ni, Na*.

Полученные результаты исследований однозначно указывают на то, что лесные экосистемы, обладая высокой замкнутостью биологического круговорота химических элементов, значительной вертикальной мощностью и огромной внутренней поверхностью, отличаются сильными буферными свойствами, что позволяет им противостоять разрушительной силе внешних воздействий и обеспечивать поддержание стабильной природной обстановки на занимаемых ими территориях.

**Таблица 2.** Средние значения показателей отклонений от контроля концентраций химических элементов в опаде и подстилке сосняков, расположенных в промышленной зоне

Элемент	M±m		F	P
	Хвоя	Опад		
N	1,1±0,06	1,2±0,08	0,04	0,8359
Si	1,4±0,13	1,84±0,74	0,26	0,6163
Ca	1,0±0,06	1,3±0,12	4,22*	0,0568
K	1,1±0,06	1,0±0,34	0,20	0,6643
Mg	1,4±0,11	1,0±0,32	0,95	0,3447
P	0,8±0,05	0,9±0,06	0,84	0,3727
Al	0,7±0,05	1,2±0,13	9,14*	0,0081
Fe	1,3±0,35	1,8±0,28	1,34	0,2641
S	1,4±0,24	1,7±0,36	0,32	0,5815
Na	1,5±0,35	1,9±0,30	0,47	0,5036
Mn	0,7±0,07	0,9±0,11	4,40*	0,0521
B	1,0±0,09	1,2±0,07	3,25*	0,0905
Cu	1,0±0,06	1,4±0,12	7,40*	0,0151
Zn	1,0±0,17	3,3±1,08	4,50*	0,0500
Ni	1,24±0,17	1,94±0,35	2,53*	0,1313
Cr	2,6±1,05	1,8±0,86	0,28	0,6043
Pb	1,3±1,14	1,6±0,31	0,79	0,3868
Co	2,0±0,47	1,4±0,34	1,26	0,2774
Sr	1,1±0,16	2,1±0,71	1,84	0,1938
Mo	0,9±0,07	1,04±0,14	0,79	0,3884

Примечание: **M** – среднее значение; **m** – ошибка; **F** – критерий Фишера; **P** – уровень значимости критерия Фишера. Значком \* отмечены наиболее выраженные различия

**Таблица 3.** Средние значения показателей отклонений от контроля концентраций химических элементов в опаде и подстилке сосняков, расположенных в промышленной зоне

Элемент	M±m		F	P
	Опад	Лесная подстилка		
	2	3	4	5
N	1,2±0,08	1,2±0,13	0,24	0,6315
Si	1,8±0,74	1,2±0,27	0,68	0,4219
Ca	1,3±0,12	1,6±0,41	0,63	0,4381
K	1,0±0,34	0,5±0,06	1,36	0,2605
Mg	1,0±0,32	0,5±0,06	2,29*	0,1493
P	0,9±0,06	0,9±0,12	0,06	0,8131
Al	1,2±0,13	1,0±0,04	1,08	0,3149
Fe	1,8±0,28	2,8±0,47	3,09*	0,0977
S	1,7±0,36	1,9±0,5	2,95	0,6902
Na	1,9±0,30	2,1±0,65	0,11	0,7404
Mn	0,9±0,11	1,5±0,20	6,74*	0,0195
B	1,2±0,07	0,7±0,06	24,98*	0,0001
Cu	1,4±0,12	1,8±0,54	0,46	0,5052
Zn	3,3±1,08	3,5±0,77	0,02	0,8826
Ni	1,9±0,35	2,4±0,95	0,32	0,5779
Cr	1,8±0,86	1,7±0,92	0,02	0,8902
Pb	1,6±0,31	1,6±0,34	0,02	0,8881
Co	1,44±0,34	1,4±0,32	0,03	0,8721
Sr	2,1±0,71	1,4±0,19	0,96	0,3422
Mo	1,0±0,14	0,8±0,10	2,23	0,1550

Примечание. Обозначения, как в табл. 3.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Кочановский, С.Б. Трансграничный перенос вредных веществ как угроза экологической безопасности Беларуси. Мат. V межд. научной конференции «Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития»

- 21 - 22 октября 2004 г. – НИИ экономики Министерства экономики РБ. Мн., 2004, Т. 3, С. 264 – 266.
2. Состояние природной среды Беларуси. Ежегодный экол. бюл. 2009 г. ГНУ «Инст. природоп. НАН РБ». – 401 с.
3. Сидорович, Е.А. Докл. АН БССР. / Е.А. Сидорович, Н.М. Арабей, Е.Г. Бусько [и др.] – 1990. – Т. 34. – № 10. – С. 941–943.
4. Алехно, А.И. Лесные ландшафты Беларуси: структурно-функциональная организация и устойчивость к техногенным нагрузкам / А.И. Алехно, Н.М. Арабей, Е.Г. Бусько [и др.] – Мн., 1992. – 295 с.
5. Бусько, Е.Г. Техногенное загрязнение лесных экосистем Беларуси / Е.Г. Бусько [и др.] – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 319 с.

Материал поступил в редакцию 23.01.12

#### BUSCO E.G. The role of technogenic pollution in transformation of mineral compounds of the main forest ecosystem components of Belarus

To match the level of the environmental pollution of Belarus by industrial pollutions were held bioindication researches of wood plant among 590 test points of plant patterns selections according to general European methods. The concentration of the heavy metals (Pb, Cd, Ni, Cr, Sr, Cu, Zn, Mn, Co) and the range of other chemical elements is marked on plasma spectrometer "Spektroflame" (Germany).

УДК 332.12(476)+911.5(476)

Пилецкий И.В., Пилецкий А.И.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ И ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ

**Введение.** Эффективное формирование системы сельскохозяйственного производства на основе территорий, наиболее полно отвечающим современным требованиям и задачам региона стало одним из стратегических направлений развития Беларуси. Одним из основных структурообразующих элементов системы сельскохозяйственного производства Белорусского Поозерья является растениеводство. Значение его определяется не только высокой долей в валовом объеме сельскохозяйственной продукции, но и большим влиянием на экологическое состояние любого региона. В растениеводческой отрасли задействована почти половина трудовых ресурсов региона и основных производственных фондов и, соответственно, затраты составляют более 40% от всех затрат на материальное производство [1]. Следовательно, эффективность управления системой сельскохозяйственного производства в значительной степени будет зависеть от состояния и развития приоритетных направлений растениеводческой отрасли, т.е. динамики урожайности сельскохозяйственных культур, и в первую очередь зернобобовых.

Под термином управление производством следует понимать хозяйственную деятельность, строящуюся на основе установленных природно-антропогенных закономерностей, и способную, при достигнутом уровне развития производительных сил, обеспечить потребности населения в продуктах питания и перерабатывающую промышленность в сырье, и целенаправленно снижать ее отрицательное воздействие на сложившиеся ландшафты региона. Такой подход к понятию «управление» предполагает соблюдение следующих важных принципов: планирование возможных объемов производства сельскохозяйственной продукции для реально сложившихся экономических условий; соблюдение паритета природоохранного и сельскохозяйственного землепользования; учет социально-экономических аспектов конкретного региона [2; 3]. Это означает, что модель организации сельскохозяйственного производства даже для весьма ограниченной территории должна учитывать большое количество как экономических, так и природно-климатических факторов, воздействие которых весьма сложно и во времени, и пространстве. По этой причине пока не разработаны модели, которые бы позволяли количественно учитывать существующие связи между этими факторами.

**Целью работы** явилось установление тенденций производства зернобобовых культур в ландшафтах Белорусского Поозерья и выявление возможности прогнозирования их урожайности с предложением модели расчета.

**Материалы и методика исследований.** Для изучения роли зернобобовых культур в управлении формированием растениеводческой отрасли сельскохозяйственного производства Белорусского Поозерья использовались статистические и картографические мате-

риалы, данные экспедиционных ландшафтных исследований, обобщения исследований других авторов с применением методов сравнительно-описательного ряда.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Совершенствование технологий возделывания сельскохозяйственных культур и уровня организации сельскохозяйственного производства не обеспечивают получения планируемых урожаев, что связано с влиянием на урожайность нерегулируемых природно-климатических факторов, которое в отдельные календарные годы проявляется по-разному [4]. Связь факторов внешней среды с биологическими процессами, определяющими рост и развитие растений, выражается в использовании растениями основных природно-климатических факторов.

В последнее время проводятся исследования, направленные на разработку физико-математических моделей для описания процессов развития растений в зависимости от факторов внешней среды. Однако в силу стохастического характера погодообразующих факторов эти модели пока не нашли широкого практического использования для разработки долгосрочного прогноза урожайности [5]. В большинстве моделей не учитывается тот фактор, что существенное и даже определяющее значение на урожайность оказывает взаимодействие между отдельными факторами, количественные выражения которого до настоящего времени не установлены.

Прогнозирование урожайности требует учета влияния комплекса факторов. Основные принципы прогнозирования сводятся к оценке роли на урожайность следующих факторов: уровня агротехники; сорта; эффективного плодородия почвы и системы удобрений; влагообеспеченности; тепловых ресурсов; величины прихода и степени использования растениями фотосинтетической активной радиации (ФАР); солнечной активности. При этом принимается равнозначность и незаменимость факторов жизни растений.

Установлено, что величина урожая любой культуры при достигнутом уровне агротехники и принятой технологии во многом зависит от складывающихся в вегетационный период погодных условий [4]. Поэтому при планировании будущего урожая должны быть учтены предстоящие погодные условия вегетации растений.

Прогнозирование урожайности по отдельным календарным годам требует и возможно при наличии на соответствующий период прогноза изменчивости лимитирующих факторов. В общем виде урожайность можно выразить как функцию от ряда конкретных воздействий (1)

$$Y = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \quad (1)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  – факторы, определяющие урожайность.

Выполненный анализ изменчивости суммы ФАР для Белорус-

*Пилецкий Иван Васильевич, к.т.н., доцент Витебской государственной академии ветеринарной медицины.*

*Беларусь, ВГАВМ, 210026, ул. 1-я Доватора, дом 7/11.*

*Пилецкий Антон Иванович, инженер-программист Войсковой части 2007.*