

5. Бурлачук, Л. Ф. Словарь-справочник по психодиагностике / Л. Ф. Бурлачук, С. М. Морозов. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Питер, 2006. — С. 256.
6. Гресь, Н. А. Состояние здоровья детей и подростков из районов, подвергшихся радиационному воздействию, и некоторые вопросы диспансеризации / Н. А. Гресь, Т. И. Полякова, А. Н. Аринчин // *Здравоохранение Беларуси*. — 1990. — № 12. — С. 3-6.
7. Грузева, Т. С. Тенденции здоровья населения, обусловленные экологическими факторами, в Европе и Украине / Т. С. Грузева // *Проблемы диагностики и коррекции состояния здоровья в напряженной экологической среде обитания: матер. второй междунар. науч. конф., посвященной 80-летию со дня рождения академика АМН СССР (РАМН) профессора Г. И. Сидоренко*. СПб., 18–19 окт. 2006 г. / под ред. проф. М. П. Захарченко — Крисмас+, 2006. — С. 224–226.
8. Грузева, Т. С. Экологическое благополучие и здоровье детей: проблемы и пути их решения / Т. С. Грузева // *Проблемы диагностики и коррекции состояния здоровья в напряженной экологической среде обитания: матер. второй междунар. научной конф., посвященной 80-летию со дня рождения академика АМН СССР (РАМН) профессора Г. И. Сидоренко*. Под общей редакцией профессора Захарченко М. П. — СПб.: Крисмас+, 2006. — С. 173–175.
9. Жарко, В. И. Состояние здоровья населения Республики Беларусь и стратегия развития здравоохранения / В. И. Жарко, В. З. Черепков, А. К. Цыбин // *Здравоохранение*. — 2007. — № 1. — С. 4–13.
10. Кутепов, Е. Н. Авария на Чернобыльской АЭС и здоровье населения Тульской области / Е. Н. Кутепов // *Гигиена и санитария*. — 1998. — № 3. — С. 23–26.
11. Лебедева, Н. Т. Приоритеты сохранения здоровья у детей / Н. Т. Лебедева, // *Здравоохранение*. — 2006. — № 7. — С. 21–23.
12. Национальный доклад о состоянии окружающей среды Республики Беларусь / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, РУП Бел НИЦ Экология; сост.: О. И. Белый, А. А. Савостенко; редкол.: В. М. Подолько [и др.]. — Мн.: Минсктиппроект, 2005. — 108 с.
13. Состояние окружающей среды Республики Беларусь: Нац. докл. / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, НАН Беларуси, Бел НИЦ Экология; редкол.: И. В. Войтов [и др.]. — Мн.: ОДО ЛОРАНЖ-2, 2001. — 96 с.
14. Природная среда Беларуси / НАН Беларуси, Ин-т. пробл. использования природ. ресурсов и экологии; под ред. В. Ф. Логинова. — Мн.: НОООО БИП-С, 2002. — 424 с.
15. Нягу, А. И. Отдаленные последствия психогенного и радиационного факторов аварии на Чернобыльской АЭС на функциональное состояние головного мозга человека / А. И. Нягу, А. Г. Нощенко, К. Н. Логановский // *Журнал невропатологии и психиатрии*. — 1992. — Т. 92, № 4. — С. 72–77.
16. Последствия Чернобыльской катастрофы: здоровье человека / под ред. Е. Б. Бураковой. — М.: Россельхозакадемия, 1996. — 290 с.
17. Пергаменик Л. А. Теоретические подходы к диагностике и реабилитации детей и подростков, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС // *Социально-психологическая реабилитация детей и подростков, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС*. — Вып. 1. — Мн., 1993. — С. 22–33.
18. Обухов, С. Г. Диагностика и терапия невротических расстройств: метод. рекомендации Минздрава Беларуси. — Гродно, 1999. — 36 с.

Поступила 26.08.2008

УДК 614.876.06:621.039.58

## ЭМПИРИКО-ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОЗЫ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЦЕЛИ ЗОНИРОВАНИЯ

А. В. Рожко, Н. Г. Власова, Л. А. Чунихин, Д. Н. Дроздов,  
Ю. В. Висенберг, С. В. Лещёва

Республиканский научно-практический центр радиационной медицины  
и экологии человека, г. Гомель

Разработанная модель для оценки дозы внутреннего облучения основана на классификации населенных пунктов по региональным особенностям почв, обуславливающих поступление  $^{137}\text{Cs}$  в продукты питания местного производства и произрастания. Построены регрессионные зависимости средней дозы внутреннего облучения от плотности загрязнения территории населенного пункта  $^{137}\text{Cs}$  для каждого региона. При оценке дозы учитывалось влияние косвенных факторов дозоформирования, которое было выражено в применении поправочных коэффициентов. Модель может быть использована для целей зонирования загрязненных территорий.

**Ключевые слова:** авария на ЧАЭС, СИЧ-измерения, доза внутреннего облучения, регрессионная модель, факторы дозоформирования.

## EMPIRICAL PROGNOSTIC ESTIMATION OF INTERNAL DOSE IN RURAL INHABITANTS FOR TERRITORIES ZONING

A. V. Rozhko, N. G. Vlasova, L. A. Chunikhin, D. N. Drozdov,  
Yu. Visenberg, S. V. Lesheva

Republican Research Center for Radiation Medicine and Human Ecology, Gomel

The developed model for estimation of the internal dose is based on the classification of settlements on the regional soil peculiarities, which caused  $^{137}\text{Cs}$ -intake of the local produced foods. The model is also based on regression dependence of the internal dose on  $^{137}\text{Cs}$ -soil contamination density for each region. The influence of indirect signs has been taken into consideration in dose estimation. The influence of indirect signs was expressed in term of correction factors. The model can be used for zoning contaminated territories.

**Key words:** Chernobyl accident, WBC-measurements, internal dose, regression model, dose formation signs.

### Введение

В отличие от монотонного снижения мощности дозы внешнего облучения на загрязненных чернобыльскими радионуклидами территориях динамика дозы внутреннего облучения (ДВО) сельских жителей в отдаленный период аварии имеет нерегулярный характер с общей тенденцией к стабилизации. Широкомасштабное проведение контрмер в личном секторе сельского хозяйства, с одной стороны, и, с другой стороны, практически полное восстановление доаварийного социального поведения и пищевых привычек привели к смещению центра тяжести дозоформирования от продуктов, полученных в личных подсобных хозяйствах (молоко, картофель, овощи, мясо), к пищевым продуктам леса (грибы, ягоды, дичь). Как известно, в лесных почвах  $^{137}\text{Cs}$  слабо мигрирует по вертикальному профилю и в настоящее время сосредоточен, в основном, в 10-см слое, что делает его легкодоступным для грибов, лесных ягод и травы, идущей на корм диким животным. В то же время существенно снизились уровни загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  молока и другой сельскохозяйственной продукции.

Такая ситуация создает определенные трудности в использовании прежних методов оценки ДВО, основанных на поступлении радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в организм человека с молоком, моделирующим всю мясо-молочную продукцию, и картофелем — растительную [1, 2]. Поправки в выражении для расчета дозы в виде коэффициентов, учитывающих потребление лесных пищевых продуктов, обычно оценивают с большой степенью неопределенности, что обусловлено, во-первых, недостаточным объемом данных по загрязнению пищевых продуктов леса и, во-вторых, внушительным перечнем факторов, влияющих на поступление  $^{137}\text{Cs}$  в лесную продукцию и на ее потребление человеком.

После введения в конце 80-х годов системы дозового мониторинга жителей загрязненных чернобыльскими радионуклидами территорий в Республике Беларусь был накоплен значительный объем информации (более 1,8 млн. результатов СИЧ-измерений), который можно вполне обоснованно использовать для оценки текущих ДВО населения. Результаты СИЧ-измерений используются для оценки средних годовых эффективных ДВО населения двумя способами: непосредственный расчет средней годовой дозы из статистически обоснованного набора СИЧ-измерений для конкретного населенного пункта (НП) и в качестве основы для разработки модельных оценок. Оценку доз облучения по СИЧ-измерениям можно считать более точной и надежной, т. к. она обусловлена фактически поступившим в организм  $^{137}\text{Cs}$  с продуктами питания.

В Публикации № 101 МКРЗ вводится понятие критической группы (КГ) как 10 % наиболее облучаемых жителей НП [3].

Согласно рекомендациям Публикации № 103 МКРЗ, облучение в отдаленный период аварии рассматривается как текущее. Дозу от такого облучения для целей зонирования необходимо оценивать как среднюю по КГ населения, что примерно соответствует дозе облучения на уровне 95 % квантиля распределения дозы. Использование значения средней дозы КГ населения для целей зонирования оправдано с точки зрения процесса формирования ДВО [4]. Как было указано выше, существенный вклад в значение ДВО вносит загрязнение пищевых продуктов леса, главным образом, грибов. Пятилетняя цикличность в урожайности грибов складывается из 2–3 малоурожайных, 1–3 среднеурожайных и 1–2 высокоурожайных лет [5].

Вследствие различного уровня потребления грибов в эти годы среднее значение ДВО жителей населенных пунктов лесной зоны варьирует в 2–3 раза. Статистический анализ результатов СИЧ-измерений сельских жителей показал, что среднее значение дозы всего населения отличается от среднего значения КГ в 2,8–3,5 раза.

### Материалы и методы

Материалом для оценки средних годовых эффективных ДВО жителей НП, расположенных на территории радиоактивного загрязнения, послужили результаты СИЧ-измерений из базы данных Государственного дозиметрического регистра за период 2005–2008 гг. Модельные оценки проводили на основе данных СИЧ-измерений по Гомельской области. Информация о плотности загрязнения населенных пунктов  $^{137}\text{Cs}$  была представлена Республиканским центром радиационного контроля и мониторинга окружающей среды.

При расчете средних годовых индивидуальных эффективных ДВО жителей НП с использованием данных СИЧ-измерений принята модель равновесного содержания  $^{137}\text{Cs}$  в теле человека, когда значение среднего в течение года суточного поступления радионуклида соответствует его среднему суточному выведению. Средняя годовая эффективная ДВО жителей  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_{\text{eff}}^{\text{int}}$ ) определяется согласно формуле:

$$E_{\text{eff}}^{\text{int}} = K_d \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i / M_i), \text{ мЗв/год} \quad (1)$$

где  $K_d$  — дозовый коэффициент, равный  $2,5 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1} / \text{кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;

$Q_i$  — содержание  $^{137}\text{Cs}$  в организме  $i$ -го человека по данным СИЧ-измерений, кБк;

$M_i$  — масса тела  $i$ -го человека, кг;

$n$  — количество обследованных на СИЧ жителей НП.

Для статистической достоверности оценки средней годовой эффективной ДВО жителей конкретного НП по результатам СИЧ-измерений использовали представительные по числу измерений и сезонной равномерности обучающей выборки [6, 7].

Из распределения ДВО жителей конкретного НП выявляли КГ, которая представляет собой выборку прошедших измерение жителей, составляющую 10 % от общего числа измерений в данном НП, имеющих наибольшие по сравнению с остальными индивидуальные значения ДВО.

Статистическую обработку полученных результатов проводили при помощи пакетов прикладных программ Microsoft Excel, «Statistica» 6.0.

**Результаты и обсуждение**

Для оценки ДВО жителей НП с недостатком или отсутствием данных по СИЧ-измерениям использовали модельные представления, основанные на учете основных и косвенных факторов формирования ДВО. К основным дозообразующим факторам отнесены свойства почв: коэффициенты перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в основную сельскохозяйственную и лесную продукцию (молоко, мясо говядины и свинины, картофель, грибы) и кислотность почв. Как было установлено, на кислых почвах поступление <sup>137</sup>Cs в растения увеличивается примерно вдвое [8].

К косвенным факторам дозоформирования отнесены численность жителей и площадь лесных массивов в ареале НП. Выбранные косвенные факторы вносят наибольший вклад в формирование ДВО, так как близость леса и

слабо развитая инфраструктура в малых и средних НП создает определенный уклад хозяйствования, близкий к натуральному. По выбранным основным и косвенным факторам была проведена классификация НП.

Для проведения классификации по основным факторам в районах Гомельской области выбирали НП, в которых за период 2005–2008 гг. было выполнено 30 и более СИЧ-измерений; выделили критическую группу и определили среднее значение ДВО лиц КГ.

Все типы почв Беларуси были объединены в 4 группы, существенно различающиеся по поступлению <sup>137</sup>Cs в сельскохозяйственную и лесную продукцию: песчаные и супесчаные, легко- и средне-суглинистые, торфяно-болотные, пойменные.

Для каждого района, расположенного на загрязненных радионуклидами территориях, были рассчитаны доли групп почв. Полученные данные использовали для получения взвешенного по набору продуктов питания сельского жителя «почвенного» индекса (F<sub>почв.</sub>), который определяется как:

$$F_{\text{почв.}} = K_{\text{дост.}} \times K_{\text{кисл.}} \quad (2)$$

где K<sub>дост.</sub> — эффективный коэффициент доступности для растений, отн. ед.; K<sub>кисл.</sub> — коэффициент, учитывающий кислотность почв, отн. ед.

Для расчета K<sub>кисл.</sub> использовали формулу:

$$K_{\text{кисл.}} = 2 \cdot \eta + (1 - \eta) \quad (3)$$

где η — доля почв в районе с pH < 5.

При расчете K<sub>дост.</sub> использовали данные, представленные в таблице 1 [6].

Таблица 1 — Коэффициент перехода (КП) <sup>137</sup>Cs в звене «почва-продукт» для групп почв

Продукт	Тип почвы			
	песчаные, супесчаные	Легко- и средне-суглинистые	торфяно-болотные	пойменные
	I	II	III	IV
Молоко	0,2	0,07	0,6	0,3
Говядина	0,6	0,25	2,0	0,5
Свинина	0,3	0,10	1,0	0,2
Картофель	0,06	0,04	0,2	0,08
Грибы	12	4	20	8

Эффективный коэффициент K<sub>дост.</sub> вычисляли для каждого района по следующей формуле:

$$K_{\text{аіііі}} = \sum \varepsilon_i \cdot K_i^{\text{аіііі}} \quad (4)$$

где ε<sub>i</sub> — доля i-й группы почв в районе; K<sub>i<sup>дост.</sup></sub> — показатель доступности i-й группы почв.

По полученным значениям F<sub>почв.</sub> все НП были классифицированы с помощью процедуры кластерного анализа на три региона: Полесский, Центральный и Северо-Восточный.

Для каждого региона была построена регрессионная модель зависимости ДВО от плот-

ности загрязнения территории НП <sup>137</sup>Cs. Полученные регрессионные зависимости представлены на рисунке 1.

Модельные оценки ДВО в каждом из трех регионов получали для усредненного по региону значения удельной площади продуктивного леса. В НП, в которых эта величина отличается от среднерегионального значения, необходимо вносить поправки на влияние косвенных факторов: числа жителей и площади леса. С этой целью была проведена классификация НП каждого региона по численности жителей и удельной площади леса вокруг НП.

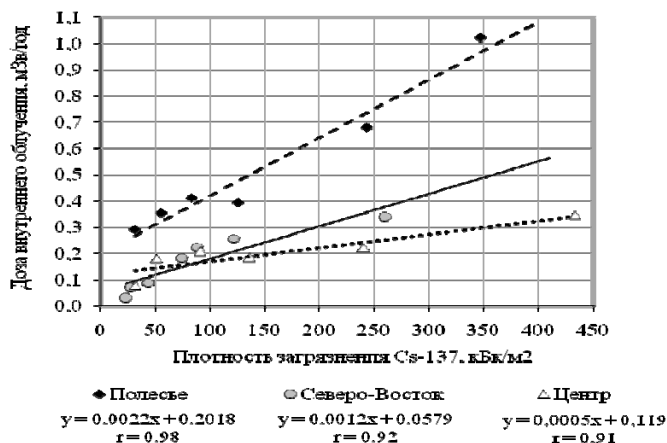


Рисунок 1 — Регрессионные зависимости ДВО от плотности загрязнения территории НП

Для проведения классификации в каждом регионе были выбраны только те НП, количество и качество СИЧ-измерений в которых обеспечивает надежность статистических оценок. На рисунке 2 показано распределение выборочных значений в сравнении с генеральными совокупностями НП для трех ре-

гионов по показателю удельной площади леса. Для Полесского региона использованные в обучающей выборке НП имеют значения удельной площади леса до 75 % от максимально возможной величины, для Северо-Восточного и Центрального регионов — едва превышают половину.

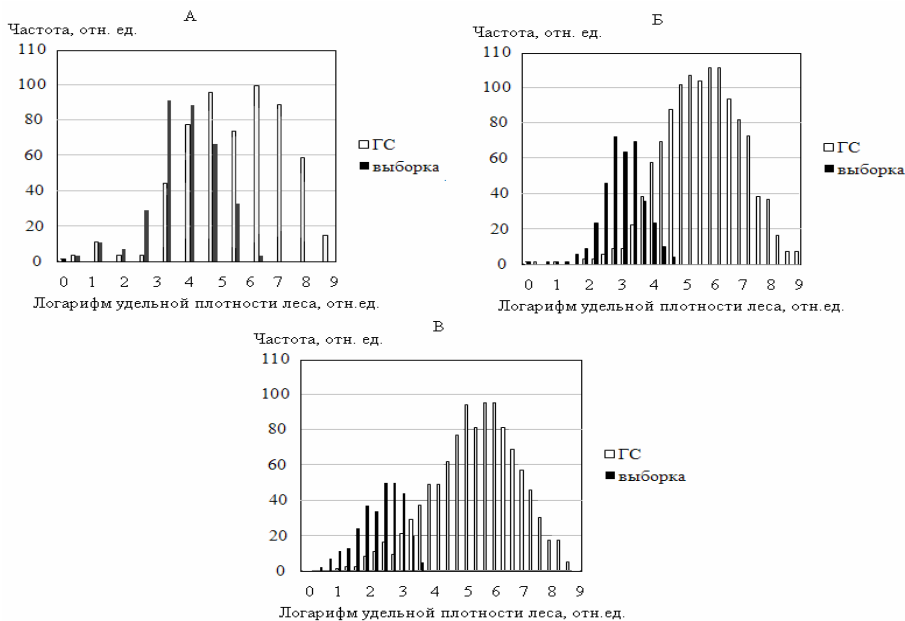


Рисунок 2 — Региональные и выборочные распределения результатов СИЧ-измерений для региона: А — Полесье, Б — Северо-Восток, В — Центр

Это означает, что при аппроксимировании значения поправочного коэффициента линейной зависимостью для НП со значениями удельной площади леса, выходящими за пределы поля регрессии, использование поправки приведет к нереалистическим значениям ДВО. В действительности значение поправочного коэффициента должно асимптотически приближаться к постоянной величине, которая характерна для реальных значений дозы в каждом НП.

Использование для экстраполяции зависимости значения поправочного коэффициента от удельной плотности леса логарифмической функции несколько снижает коэффициент корреляции регрессии по сравнению с линейной, однако практически исключает существенную переоценку ДВО.

На рисунке 3 приведены регрессионные зависимости поправочного коэффициента, аппроксимированные функцией натурального логарифма вида:  $y = a \times \ln(x) + b$ .

Для нахождения поправочных коэффициентов определяли среднее значение удельной площади леса, которое принимали за 1. Были построены регрессионные зависимости попра-

вочного коэффициента ( $K_{\text{попр.}}$ ) от удельной площади леса в НП. Регрессионные зависимости  $K_{\text{попр.}}$  от удельной площади леса для трех регионов приведены на рисунке 3.

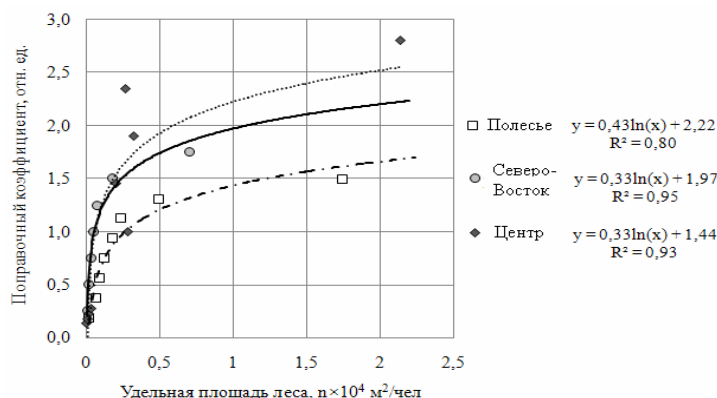


Рисунок 3 — Регрессионные зависимости  $K_{\text{попр.}}$  от удельной площади леса

Применение нелинейной функции для аппроксимации зависимости значения поправочного коэффициента от удельной площади леса существенно повышает качество модели, т. к. при неограниченном увеличении площади леса на человека, его возможности в потреблении пищевой продукции леса и, следовательно, в увеличении собственного значения ДВО ограничены.

Было оценено качество модели для расчета средних ДВО. Для этого была сформирована контрольная выборка, в которую вошли 45 НП Гомельской области, с обследованием за период 2005–2008 гг. более 30 % населения. Для каждого НП по модели была рассчитана средняя годовая ДВО без учета коэффициента поправки и с его учетом. Гипотеза о нормальном распределении ДВО проверялась с помощью критерия Шапиро-Уилка. Значимость различий оценивали по критерию Вилкоксона для примеров, подчиняющихся законам логнормального распределения. В результате парного сравнения было установлено, что использование поправочных коэффициентов в первом регионе обуславливает увеличение соответствия эмпирических и рассчитанных по модели данных на 38 %, во втором регионе вероятность увеличивается на 15 % а в третьем — на 69 %.

Таким образом, можно говорить, что использование поправочных коэффициентов улучшает качество модели и приближает ее к реальной ситуации. Улучшение представительности обучающих выборок при расширении базы данных СИЧ-измерений позволят провести более точные оценки ДВО населения.

#### Заключение

Таким образом, разработанная модель оценки ДВО, основанная на результатах СИЧ-измерений, может быть использована для целей зонирования загрязненных чернобыльскими радионуклидами территорий. Неопределенность

оценок, выполненных по модели, главным образом, обусловлена неполнотой базы данных, используемой для моделирования.

Сравнение средних ДВО, рассчитанных по модели с использованием поправочных коэффициентов, свидетельствует об улучшении качества прогнозных оценок. Необходимо отметить, что представительность обучающих выборок может быть существенно улучшена за счет расширения базы данных СИЧ-измерений и целенаправленного формирования обучающих выборок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Определение годовых суммарных эффективных эквивалентных доз облучения населения для контролируемых районов РСФСР, УССР, БССР, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС: метод. указания, утверждены А. И. Кондрусевым 05.07.91. — М., 1991.
2. Оценка эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения лиц, которые проживают на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС: метод. указания, утверждены Главным государственным санитарным врачом Республики Беларусь. — Мн., 2003.
3. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process / Publication 101 of the ICRP // Editor J. Valentin, 2006.
4. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection / Publication 103 of the ICRP // Editor J. Valentin, 2007.
5. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации // Институт леса НАН Беларуси; под ред. В. А. Ипатьев [и др.]. — Гомель, 1999. — 454 с.
6. Радиационный мониторинг облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС / ТС проект RER/9/074 / М. И. Балонев. [и др.]. — Вена, Австрия, 2007, — 119 с.
7. Власова, Н. Г. Методологический подход к реконструкции индивидуальной дозы облучения населения, проживающего на загрязненной радионуклидами территории / Н. Г. Власова // Экологический вестник. — 2007. — № 2. — С. 13–22.
8. Правила ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения Республики Беларусь на 2002–2005 гг. / под ред. проф. И. М. Богдевича. — Мн., 2002. — 74 с.