

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА / TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

УДК 631.17:519.8:502.13

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202102.227-240

Оригинальная статья



Модель прогнозирования комплексного негативного воздействия технологий сельхозпроизводства на водные объекты

И. А. Субботин*, Э. В. Васильев

*Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства – филиал
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)*

**itmo1652@mail.ru*

Введение. Цель исследования – разработка математической модели, позволяющей оценивать и прогнозировать комплексное негативное воздействие на водные объекты технологий сельхозпроизводства. Данная проблема актуальна ввиду необходимости укрупнения сельхозпредприятий. Модель прогнозирования важна для оценки с учетом комплексного влияния машинных технологий сельхозпроизводства и всех биогенных элементов, отрицательно воздействующих на водные объекты.

Материалы и методы. Использован метод логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова, позволяющий формализовать экспертные знания в математическую модель. Были опрошены 4 эксперта, а полученные данные обработаны и подвергнуты регрессионному анализу. Адекватность модели проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера.

Результаты исследования. Сформирована иерархическая система из 6 факторов и 14 подфакторов, включающих как применяемые машинные технологии, так и принимаемые управленческие решения. Получена модель, содержащая полиномиальное уравнение, отражающее влияние факторов на уровень негативного воздействия технологий, и уравнения, определяющие влияние подфакторов на факторы.

Обсуждение и заключение. Полученная модель может быть использована в практических целях для поддержки принятия решений планирования, прогнозирования и выбора сценариев модернизации сельхозпредприятий. Уравнения модели позволяют понять значимость факторов и подфакторов, влияющих на уровень негативного воздействия (диффузную нагрузку) на водные объекты. Это позволяет выбирать эффективные пути снижения негативного воздействия путем выбора в качестве объектов наиболее значимых факторов и/или подфакторов.

© Субботин И. А., Васильев Э. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: технологии сельхозпроизводства, экологическая оценка, моделирование, прогнозирование, инженерная экология, комплексное негативное воздействие

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Субботин, И. А. Модель прогнозирования комплексного негативного воздействия технологий сельхозпроизводства на водные объекты / И. А. Субботин, Э. В. Васильев. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202102.227-240 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 227–240.

Original article

A Forecast Model of the Complex Negative Impact of Agricultural Production Technologies on Water Bodies

I. A. Subbotin*, E. V. Vasilev

*Institute for Engineering and Environmental Problems
in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific
Agroengineering Center VIM (Saint Petersburg, Russian Federation)
itmo1652@mail.ru

Introduction. The purpose of research is to develop a mathematical model for assessing and forecasting the complex negative impacts of agricultural technologies on water bodies. This problem is relevant because of the need to enlarge agricultural enterprises. The created model for forecasting is necessary to make an objective assessment, taking into account the complex effect of machine technologies applied to agricultural production and all biogenic elements that have a negative impact on water bodies.

Materials and Methods. There was used the Spesivtsev – Drozdov method of logical-linguistic modeling, which allows giving expert knowledge a form mathematical model. Four experts were interviewed, and the obtained data became a subject of the regression analysis. The adequacy of the model was confirmed using the coefficient of determination and Fisher's test.

Results. A hierarchical system of 6 factors and 14 sub-factors was formed, including both the applied machine technologies and the management decisions on the matter. There was created a model containing a polynomial equation reflecting the influence of factors on the level of negative impact of technologies and equations that determine the influence of sub-factors on factors.

Discussion and Conclusion. The created model can be used for practical purposes to support making decisions for planning, forecasting and selecting scenarios to modernize agricultural enterprises. The model equations make it possible to understand the significance of factors and sub-factors affecting the level of negative impact (diffuse load) on water bodies. This allows us to choose more effective ways to reduce the negative impact by choosing the most significant factors and/or sub-factors as objects of management.

Keywords: agricultural technologies, environmental assessment, modeling, forecasting, engineering ecology, complex negative impact

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Subbotin I.A., Vasilev E.V. A Forecast Model of the Complex Negative Impact of Agricultural Production Technologies on Water Bodies. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):227-240. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.227-240>

Введение

Современные сельхозпредприятия используют высокопроизводительные и энергоёмкие технологии и техниче-

ские средства, которые могут оказывать значительное негативное воздействие на окружающую среду. Одной из актуальных научных проблем является

комплексное определение негативно-го влияния сельхозпроизводства на гидросферу. Эта задача осложняется большими площадями сельскохозяйственных полей, с которых происходит сток загрязняющих веществ, свойствами почвы, факторами, влияющими на интенсивность загрязнений. Такую диффузную (распределенную в пространстве) нагрузку практически невозможно измерить инструментальными методами ввиду больших площадей изучаемых объектов – сельскохозяйственных полей. Данная проблема особенно актуальна в бассейнах крупных водоемов, например в районе Балтийского моря, на территории которого расположены 9 государств, между которыми подписаны природоохранные соглашения. Традиционные природоохранные исследования, как правило, сфокусированы на проблеме влияния конкретных машинных технологий в определенных условиях. Получаемые в результате расчетные модели неприменимы для комплексной оценки влияния на водные объекты сельхозпроизводства в целом. Почти во всех существующих исследованиях по данной тематике рассматриваются более простые задачи выбора и сравнения критериев и методов оценки и не рассматривается задача прогнозирования негативного воздействия на окружающую среду. Цель исследования – разработка математической модели, позволяющей оценивать и прогнозировать

комплексное негативное воздействие технологий сельхозпроизводства на водные объекты.

Обзор литературы

Ряд современных российских и зарубежных исследований затрагивает эту научную проблему, однако чаще всего авторы ограничиваются постановкой частных вопросов [1; 2]. Другие авторы сравнивают конкретные методы оценки [3–6] и теоретико-методологические подходы к решению проблемы негативного влияния сельхозпроизводства [7–9]. Некоторые работы направлены на исследование и обоснование критериев оценки¹ [10–12]. Важными вопросами являются анализ конкретных источников загрязнений внутри сельхозпредприятий [13–15] и изучение негативного воздействия отдельных видов загрязнений² [16; 17].

Распространенной практикой является экспертная оценка выбранных показателей негативного воздействия [18; 19]. В то же время вопрос формализации зависимостей с получением конкретных расчетных формул применительно к влиянию технологий сельхозпроизводства на водные объекты в известных публикациях исследовано мало. Часто исследователи фокусируются на конкретных, наиболее значимых с точки зрения негативного воздействия, машинных технологиях [20–23]. Некоторые авторы рассматривают проблему негативного воздействия сельхозпроизводства на региональном

¹ Agricultural Impacts on Landscapes: Developing Indicators for Policy Analysis // Proceedings from NIIOS/OECD Expert Meeting on Agricultural Landscape Indicators in Oslo, Norway October 7-9, 2002 / W. Dramstad, Ch. Sogge (eds.). Oslo: NIBIO, 2003. 347 p. URL: <https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/handle/11250/2558838?locale-attribute=en> (дата обращения: 01.09.2020); Environmental Indicators for Agriculture. Vol. 3: Methods and Results [Электронный ресурс]. 2001. 409 p. URL: <https://www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/1916629.pdf> (дата обращения: 01.09.2020).

² Selecting Manure Management Technologies to Reduce Ammonia Emissions from Big Livestock Farms in the Northwestern Federal District of Russia / D. A. Maximov [et al.] // Ammonia Workshop 2012 Saint Petersburg: Abating Ammonia Emissions in the UNECE and EECCA Region / K. W. Van der Hoek, N. P. Kozlova (eds.). Bilthoven, 2014. Pp. 161–168. URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2014/AIR/WGSR/St.Peterburg_WS_Ammonia_proceedings_2012.pdf (дата обращения: 01.09.2020).

уровне³ [24–26]. Также необходимо отметить, что почти все публикации на тему негативного воздействия сельхозпроизводства на окружающую среду направлены на оценку текущей ситуации и не рассматривают задачу прогнозирования [27–29]. В процессе поиска литературных источников авторами было найдено лишь четыре статьи, связанные с прогнозированием негативного воздействия сельхозпроизводства [11; 22; 30; 31]. Таким образом, научная новизна настоящего исследования состоит в комплексной оценке (учитывается не конкретная технология или вещество-загрязнитель, а воздействие в целом) негативного влияния на водные объекты и построении математической модели, пригодной для прогнозирования.

Материалы и методы

Для построения математической модели, необходимой для оценивания и прогнозирования негативного воздействия технологий сельхозпроизводства, был использован метод логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова [31]. Данный подход содержит следующие действия: выбор и обоснование факторов, влияющих на изучаемое явление или объект и выбор целевой функции, для которой планируется определить формулу, раскрывающую ее зависимости от факторных переменных; определение диапазонов принимаемых значений (или перечня значений в случае качественных переменных) факторных переменных и формирование шкал оценки значений с использованием аппарата нечеткой логики; формирование опросных матриц; опрос экспертов (фиксация лингвистических значений целевой функции для сочетаний факторных

значений и перевод из лингвистической в численную форму); обработка экспертных оценок методами регрессионного анализа; проверка адекватности полученной модели по коэффициенту детерминации (R^2) и критерию Фишера; при необходимости (в случае низкого значения коэффициента детерминации) – дополнительная работа с экспертами для корректировки набора факторных переменных или корректировки значений экспертных оценок. Метод логико-лингвистического моделирования достаточно хорошо апробирован, в том числе при решении агроэкологических проблем [22; 31; 32]. Экспертами были обоснованы факторы и для некоторых (X_4 , X_5 , X_6) были определены подфакторы. Методом логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова получены полиномиальные уравнения, определяющие влияние подфакторов на факторы.

Опросная матрица для получения главного уравнения, необходимого для определения уровня негативного влияния сельхозпроизводства на водные объекты, представляет собой таблицу в виде полуреплики матрицы полнофакторного эксперимента (32 строки экспертных оценок). Уровень негативного влияния сельхозпроизводства на водные объекты определяется целевым показателем Y – уровень диффузной нагрузки, отражающий объем биогенных элементов, поступающих от сельхозпредприятия в водные объекты (кг/год). В качестве экспертов были привлечены 4 ученых, имеющих многолетний опыт участия в полевых исследованиях стоков с сельхозпредприятий в реки Ленинградской области. Регрессионный анализ был выполнен с помощью компьютерной программы Scilab 6.1.0.

³ Baker E., Boileau P., Beaudoin Y. Guidelines for Conducting Integrated Environmental Assessments [Электронный ресурс]. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/327498509_Guidelines_for_conducting_Integrated_Environmental_Assessments (дата обращения: 01.09.2020).

Результаты исследования

В соответствии с выбранным методом логико-лингвистического моделирования был определен целевой показатель Y (1). В качестве 6 факторов, влияющих на уровень диффузной нагрузки, были выбраны следующие: $X1$ – применяемая технология внесения удобрений; $X2$ – применяемая технология обработки почвы; $X3$ – применяемые технологии очистки поверхностных, грунтовых и дренажных вод с полей; $X4$ – соблюдение агротехнологических требований; $X5$ – соблюдение агроэкологических требований; $X6$ – использование цифровых технологий в технологических процессах.

Фактор $X1$ подразумевает использование одной из 9 машинных технологий внесения жидкого (ЖОУ) или твердого (ТОУ) органического удобрения:

- 1) поверхностное разбрызгивание ЖОУ;
- 2) поверхностное разбрызгивание ЖОУ с последующей запашкой;
- 3) поверхностное ленточное внесение через шланговую систему;
- 4) поверхностное ленточное внесение через шланговую систему с башмаками;
- 5) внутрипочвенное внесение в открытые канавки;
- 6) внутрипочвенное внесение с последующим закрытием канавок;
- 7) внутрипочвенное внесение с применением культиватора;
- 8) внесение ТОУ разбрасыванием;
- 9) внесение ТОУ разбрасыванием с последующей запашкой.

В зависимости от выбранной технологии степень вымывания внесенных удобрений в водные объекты значительно варьируется.

Фактор $X2$ подразумевает выбор одной из пяти технологий обработки почвы: минимальная, нулевая, комбинированная, безотвальная, отвальная (классическая технология вспашки).

Фактор $X3$ отражает инженерные методы и технологии, применяемые на сельхозпредприятии для очистки поверхностных, грунтовых и дренажных вод с полей, и содержит 4 подфактора: изменение микрорельефа поля в зоне впадения стока в водные объекты ($X3.1$); изменение (конструирование) русла дренажных каналов с целью снижения скорости потока стоков ($X3.2$); высаживание в зоне поступления стоков растений, поглощающих биогенные элементы ($X3.3$); очистка системой отстойников с применением биологизированных фильтров ($X3.4$).

В отличие от факторов $X1$ и $X2$, где зависимость определялась выбором одной из технологий перечня, фактор $X3$ содержит подфакторы, каждый из которых может принимать положительное (в случае применения данного инженерного метода или технологии) либо отрицательное (в случае неприменения) значение. Факторы $X4$, $X5$ и $X6$ аналогичным образом содержат подфакторы.

Фактор $X4$ (соблюдение агротехнологических требований) включает в себя следующие подфакторы:

- 1) соблюдение сроков внесения удобрений (вегетативные периоды) (подфактор $X4.1$);
- 2) выдерживание сроков запашки удобрений после внесения (подфактор $X4.2$);
- 3) учет природно-климатических условий (уровень солнечной радиации, ветер, давление, осадки) при определении сроков выполнения производственных процессов (подфактор $X4.3$);
- 4) соблюдение агрономически обоснованной дозы внесения удобрений (подфактор $X4.4$).

Фактор $X5$ (соблюдение агроэкологических требований) включает в себя 3 подфактора:

- 1) соблюдение сроков временного складирования органических удобрений (подфактор $X5.1$);

2) соблюдение экологически безопасного расстояния от места временного складирования органических удобрений до водных объектов (подфактор X5.2);

3) выбор типа почвы с минимальными фильтрационными свойствами для места временного складирования твердых органических удобрений (подфактор X5.3).

Фактор X6 (использование цифровых технологий в технологических процессах) включает в себя 3 подфактора:

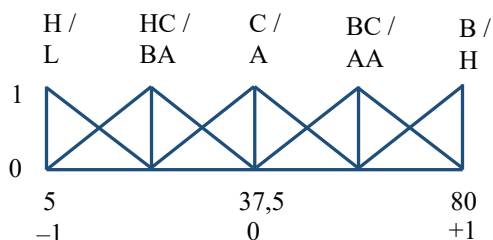
1) наличие внедренной системы мониторинга, контроля и принятия решений для эффективной реализации технологий внесения удобрений (подфактор X6.1);

2) применение дифференцированного внесения удобрений в зависимости от типа почвы, расстояния до водных объектов, уклона полей, природоохранного статуса земель и т. п. (подфактор X6.2)

3) использование цифровых паспортов полей (подфактор X6.3).

Данная совокупность факторов и подфакторов выбрана с учетом системного подхода к изучаемому явлению: факторы X1–X3 характеризуют применяемые машинные технологии; X4, X5 – применяемые управленческие решения. Фактор X6 характеризует эффективность контроля выполнения технологических операций и позволяет точно оценивать эффект от принимаемых решений. Для каждой лингвистической переменной были разработаны индивидуальные шкалы.

Для целевой функции и каждой факторной переменной (X1–X6) были построены шкалы, позволяющие соотносить лингвистические оценки экспертов, численные значения показателей и логические значения (–1 и +1). На рисунке 1 показана шкала для целевой функции Y, которая содержит лингвистические значения.



Р и с. 1. Оппозиционная шкала для значений целевой функции: Н – низкий уровень поступления загрязняющих веществ в водные объекты; HC – уровень поступления ниже среднего; C – средний уровень поступления; BC – уровень поступления выше среднего; B – высокий уровень поступления загрязняющих веществ

F i g. 1. Oppositional scale for objective function values: L – low level of inputting pollutants in water bodies; BA – level of inputting pollutants in water bodies is below average; A – average level of inputting pollutants in water bodies; AA – the level of inputting pollutants in water bodies is above average; H – high level of inputting pollutants in water bodies

В дальнейшем использовались более точные лингвистические значения. Например, HC-C – значение уровня загрязнения, расположенное между уровнем HC (ниже среднего) и C (средний) (BA-A – below average – average), и HCC-C – уровень загрязнения, расположенный между уровнем HC-C и C (BAA-A – level between “below average – average” and “average” levels).

Лингвистическому значению Н соответствует логическое значение –1 и численное значение 5 (кг/га) – минимальное количество вымываемых биогенных элементов в водные объекты. Аналогичным образом строятся оппозиционные шкалы для каждой факторной переменной X1–X6.

Далее была сформирована опросная матрица, в которой экспертам было необходимо оценить негативное воздействие в зависимости от различных сочетаний значений выбранных факторов. Полная матрица содержит 32 строки сочетаний факторных значений, фрагмент заполненной матрицы представлен в таблице.

Опросная матрица для сбора экспертных оценок (фрагмент)
Questionnaire matrix for collecting expert assessments (fragment)

X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y_{ling}	Y_{chisl}
-1	-1	-1	-1	-1	-1	H / L	86,7383
1	-1	-1	-1	-1	1	C-CBC / A-AAA	48,6525
-1	1	-1	-1	-1	1	HCC-C / BAA-A	57,4415
1	1	-1	-1	-1	-1	HC-C / BA-A	55,6837
-1	-1	1	-1	-1	1	C-CBC / A-AAA	54,5117
1	-1	1	-1	-1	-1	C / A	52,7539
-1	1	1	-1	-1	-1	HCC-C / BAA-A	61,5429
1	1	1	-1	-1	1	BC-B / AA-H	23,4571
-1	-1	-1	1	-1	1	HC-HCC / BA-BAA	62,7149
1	-1	-1	1	-1	-1	HCC-C / BAA-A	60,9571
-1	1	-1	1	-1	-1	H-HC / L-BA	69,7461
1	1	-1	1	-1	1	BCB-B / AAH-H	31,6603
-1	-1	1	1	-1	-1	HCC-C / BAA-A	66,8163
1	-1	1	1	-1	1	BC / AA	28,7305
-1	1	1	1	-1	1	C-CBC / A-AAA	37,5195
1	1	1	1	-1	-1	BC / AA	35,7617

Столбцы X1–X6 заполнены логическими значениями –1 и +1 (соответствующими минимальным и максимальным значениям факторных переменных) согласно с положением метода Спесивцева – Дроздова. Эксперты заполнили матрицу лингвистическими оценками Y_{ling} , после чего они были переведены в численную форму Y_{chisl} с помощью шкалы Y (рис. 1).

Далее, проведя регрессионный анализ для столбца Y_{chisl} , получаем полиномиальное выражение, отражающее влияние факторов на уровень негативного воздействия на водные объекты:

$$Y = 47,4805 - 9,9609X_1 - 5,5664X_2 - 7,0313X_3 - 2,9297X_4 - 4,6875X_5 - 9,082X_6. \quad (1)$$

Адекватность модели была подтверждена с помощью коэффициента детерминации (R^2) и критерия Фишера. Было установлено, что $R^2 = 91,44\%$, то есть 91,44 % общей вариабельности Y объясняется изменением факторов X1–X6, что делает уравнение статистически значимым.

Аналогичным образом (путем формирования, заполнения и обработки опросных матриц) для факторов X3–X6 были получены соответствующие полиномиальные уравнения, отражающие взаимосвязь между подфакторами и факторами:

$$X_3 = 0,0719 + 0,125X_{3.1} + 0,1406X_{3.2} + 0,2813X_{3.3} + 0,5313X_{3.4}, \quad (2)$$

$$X_4 = 0,04688 + 0,2656X_{4.1} + 0,3125X_{4.2} + 0,125X_{4.3} + 0,375X_{4.4}, \quad (3)$$

$$X5 = 0,125 + 0,125X5.1 + 0,5938X5.2 + 0,25X5.3, \quad (4)$$

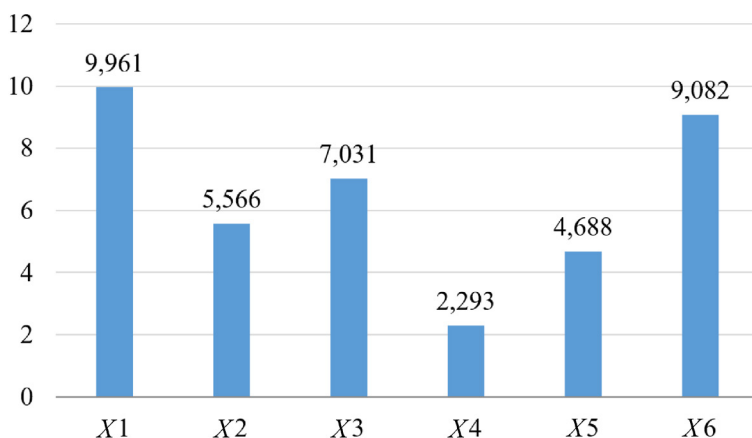
$$X6 = 0,1875 + 0,375X6.1 + 0,4375X6.2 + 0,1875X6.3. \quad (5)$$

Обсуждение и заключение

Полученная модель, состоящая из уравнений (1)–(5), может быть использована в практических целях для планирования, прогнозирования и модернизации сельхозпредприятий. Уравнения модели позволяют понять значимость факторов и подфакторов, влияющих на уровень негативного воздействия (диффузную нагрузку) на водные объекты. Важность каждого критерия может быть оценена на основе соответствующего весового коэффициента. Например, весовой коэффициент $X1$ имеет значение 9,9609, что в 3,4 раза больше значения весового коэффициента $X4$. Из этого можно сделать вывод, что значимость фактора $X1$ в 3,4 раза больше, чем фактора $X4$. Следовательно, замена технологии внесения удобрений (фактор $X1$) в 3,4 раза более эффективна, чем улучшение соблюдения агротехнологических требований (фактор $X4$).

На рисунке 2 показано сравнение всех весовых коэффициентов формулы (1), из которого следует, что наиболее значимым фактором негативного воздействия сельхозпроизводства на водные объекты является фактор $X1$ (технология внесения удобрений), чуть меньшую значимость имеет фактор $X6$ (использование цифровых технологий в технологических процессах), наименьшее значение имеет фактор $X4$ (соблюдение агротехнологических требований без нарушения норм и требований законодательства).

Использование созданной модели позволяет производить оценку текущего негативного воздействия сельхозпроизводства на водные объекты и прогнозировать уровень негативного воздействия, используя в качестве исходных данных ожидаемые в будущем значения факторных переменных, а также выбирать более эффективные пути снижения негативного воздействия путем выбора в качестве объектов воздействия наиболее значимых факторов и/или подфакторов.



Р и с. 2. Сравнение весовых коэффициентов факторных переменных
F i g. 2. Comparison of weighting coefficients of factor variables

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Байрамукова, С. Р. Воздействие предприятий агропромышленного комплекса на окружающую среду / С. Р. Байрамукова, В. Ю. Мешарова // Стратегия устойчивого развития регионов России. – 2015. – № 29. – С. 52–55. – URL: <https://clck.ru/U2G3o> (дата обращения: 01.09.2020).
2. Степанова, Л. П. Экологические проблемы земледелия / Л. П. Степанова, Е. Н. Цыганок, И. М. Тихойкина // Вестник ОрелГАУ. – 2012. – № 1. – С. 11–17. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-zemledeliya> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
3. Афанасьев, В. Н. Снижение негативного влияния машинных технологий в сельском хозяйстве на состояние окружающей среды / В. Н. Афанасьев, Н. П. Козлова, А. В. Афанасьев // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2013. – № 84. – С. 133–141. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22677100> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
4. Попов, В. Д. Экология сельхозпроизводства: проблемы и решения / В. Д. Попов, Д. А. Максимов, А. Ю. Брюханов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 3. – С. 43–48. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/138> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
5. Werf, H. M. G. Evaluation of the Environmental Impact of Agriculture at the Farm Level: A Comparison and Analysis of 12 Indicator-Based Methods / H. M. G. Werf, J. Petit. – DOI 10.1016/S0167-8809(01)00354-1 // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2002. – Vol. 93, Issue 1–3. – Pp. 131–145. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880901003541?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
6. Nootboom, S. Comparing Strategic Environmental Assessment and Integrated Environmental Assessment / S. Nootboom, K. Wieringa. – DOI 10.1142/S146433329900034X // Journal of Environmental Assessment Policy and Management. – 2012. – Vol. 1, no. 4. – Pp. 441–457. – URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S146433329900034X> (дата обращения: 01.09.2020).
7. Agelebe, D. Environmental Impact Assessment Systems / D. Agelebe, M. Prityi, J. Nielsen. – DOI 10.4324/9780429397615 // Environmental Law Across Cultures ; ed. by K. W. Junker. – 1st ed. – London : Routledge, 2019. – 41 p. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.4324/9780429397615/environmental-law-across-cultures-kirk-junker> (дата обращения: 01.09.2020).
8. Орлова, И. В. Оценка сельскохозяйственного воздействия на природные системы: теоретико-методологические подходы / И. В. Орлова, С. Н. Шарбарина // География и природные ресурсы. – 2015. – № 4. – С. 26–32. – URL: http://www.izdatgeo.ru/journal.php?action=output_more&id=3&lang_num=1&year=2015&issue=4&nodoi=1&page=26 (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
9. Canter, L. W. Environmental Impact of Agricultural Production Activities / L. W. Canter. – DOI 10.1201/9781351071796. – 1st ed. – Boca Raton : CRC Press, 1986. – 400 p. – URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781351071796/environmental-impact-agricultural-production-activities-larry-canter> (дата обращения: 01.09.2020).
10. Using the Integrated Ecosystem Assessment Framework to Build Consensus and Transfer Information to Managers / P. Fletcher, Ch. Kelble, W. Nuttle, G. Kiker. – DOI 10.1016/j.ecolind.2014.03.024 // Ecological Indicators. – 2014. – Vol. 44. – Pp. 11–25. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14001265?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
11. Environmental Impact Assessment of Agricultural Production Systems Using the Life Cycle Assessment Methodology: I. Theoretical Concept of a LCA Method Tailored to Crop Production / F. Brentrup, J. Küsters, H. Kuhlmann, J. Lammel. – DOI 10.1016/S1161-0301(03)00024-8 // European Journal of Agronomy. – 2004. – Vol. 20, Issue 3. – Pp. 247–264. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030103000248?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
12. Показатели негативного воздействия на окружающую среду при производстве сельскохозяйственной продукции / А. Ю. Брюханов, Е. В. Шалавина, Э. В. Васильев, Н. С. Обломкова. – DOI 10.24411/0131-5226-2019-10170 // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 2 (99). – С. 250–260. – URL: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10170> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.

13. **Sousa, P.** Ecosystem Services in Environmental Impact Assessment / P. Sousa, D. Gomes, N. Formigo. – DOI 10.1016/j.egy.2019.09.009 // *Energy Reports*. – 2020. – Vol. 6, Issue. 1. – Pp. 466–471. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719305268?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
14. **Wu, J.** Environmental Impact Assessment / J. Wu, I.-S. Chang. – DOI 10.1007/978-981-15-4894-9_42020 // *Environmental Management in China*. – Singapore : Springer, 2020. – Pp. 35–62. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-15-4894-9_4 (дата обращения: 01.09.2020).
15. Environmental Impact Assessment of Farming with Combined Methods of Life Cycle Assessment and Farm Carbon Calculator / D. Su, J. Smith, Y. Wu, Z. Ren. – DOI 10.1007/978-3-030-39149-2_12 // *Sustainable Product Development*; ed. by D. Su. – Cham : Springer, 2020. – Pp. 249–270. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-39149-2_12#citeas (дата обращения: 01.09.2020).
16. **Gomiero, T.** Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture / T. Gomiero, D. Pimentel, M. G. Paoletti. – DOI 10.1080/07352689.2011.554355 // *Critical Reviews in Plant Sciences*. – 2011. – Vol. 30, Issue 1–2. – Pp. 95–124. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07352689.2011.554355> (дата обращения: 01.09.2020).
17. **Ferro, V.** Soil Sediment Loading and Related Environmental Impacts from Farms / V. Ferro. – DOI 10.1093/acrefore/9780199389414.013.267. – Текст : электронный // *Oxford Research Encyclopedias*. – 2017. – URL: <https://oxfordre.com/environmentalscience/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-267> (дата обращения: 01.09.2020).
18. Environmental Assessment of Livestock Farms in the Context of BAT System Introduction in Russia / A. Briukhanov, E. Vasilev, N. Kozlova [et al.]. – DOI 10.1016/j.jenvman.2019.05.105 // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 246. – Pp. 283–288. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719307339?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
19. **Li, Y.** Agricultural Production Mode and Its Environmental Impact / Y. Li. – DOI 10.1142/9789811202919_0006. – Текст : электронный // *Environmental Economics Research and China's Green Development Strategy*; ed. by Y. Zhang. – 2020. – URL: https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789811202919_0006 (дата обращения: 01.09.2020).
20. **Karayel, D.** Environmental Impact of No-Tillage Farming / D. Karayel, E. Saraukis. – DOI 10.5755/j01.irem.75.1.20861. – Текст : электронный // *Environmental Research, Engineering and Management*. – 2019. – Vol. 75, no. 1. – URL: <https://irem.ktu.lt/index.php/irem/article/view/20861> (дата обращения: 01.09.2020).
21. **Гриднев, П. И.** Методология экологической оценки систем уборки и подготовки навоза к использованию / П. И. Гриднев, Т. Т. Гриднева, А. А. Шведов // *Вестник ВНИИМЖ*. – 2018. – Вып. 2 (30). – С. 159–167. – URL: <http://www.vniimzh.ru/images/material/Magazines/n30.pdf> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.
22. Logical-Linguistic Model of Farm Organic Waste Recycling / A. Yu. Briukhanov, A. V. Trifanov, A. V. Spesivtsev [et al.]. – DOI 10.1109/SCM.2017.7970556 // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – St. Petersburg : IEEE, 2017. – Pp. 265–267. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7970556> (дата обращения: 01.09.2020).
23. **Peigné, J.** Environmental Impacts of Farm-Scale Composting Practices / J. Peigné, P. Girardin. – DOI 10.1023/B:WATE.0000019932.04020.b6 // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 2004. – Vol. 153. – Pp. 45–68. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FB%3AWATE.0000019932.04020.b6#citeas> (дата обращения: 01.09.2020).
24. Assessment of Urban Groundwater Vulnerability in Arid Areas: Case of Sidi Bouzid Aquifer (Central Tunisia) / G. Safa, C. Najiba, B. N. El Houda [et al.]. – DOI 10.1016/j.jafrearsci.2020.103849. – Текст : электронный // *Journal of African Earth Sciences*. – 2020. – Vol. 168. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X2030100X?via%3Dihub> (дата обращения: 01.09.2020).
25. Модель комплексной оценки экологической опасности и охраны труда в сельском хозяйстве в условиях развития органического земледелия / Н. Н. Новиков, Н. Т. Сорокин, Н. Н. Грачев [и др.]. – DOI 10.18470/1992-1098-2019-2-99-119 // *Юг России: экология, развитие*. – 2019. – Т. 14, № 2. – С. 99–119. – URL: <https://ecodag.elpub.ru/ugro/article/view/1608> (дата обращения: 01.09.2020). – Рез. англ.

26. **Mulyk, T.** Environmental Impact Assessment of Agriculture: A Regional Aspect / T. Mulyk. – DOI 10.31521/modecon.V19(2020)-22 // Modern Economics. – 2020. – Vol. 19. – Pp. 135–142. – URL: <https://modecon.mnau.edu.ua/en/environmental-impact-assessment-of-agriculture/> (дата обращения: 01.09.2020).
27. Environmental Impact Assessment of Agricultural Production in Chongming Ecological Island / Sh. Li, B. Huang, F. Zhao [et al.]. – DOI 10.1007/s11367-019-01614-w // The International Journal of Life Cycle Assessment. – 2019. – Vol. 24. – Pp. 1937–1947. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-019-01614-w> (дата обращения: 01.09.2020).
28. Achieving Good Environmental Status in the Black Sea: Scale Mismatches in Environmental Management / T. O’Higgins, A. Farmer, G. Daskalov [et al.]. – DOI 10.5751/ES-06707-190354 // Ecology and Society. – 2014. – Vol. 19, Issue 3. – Pp. 54. – URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol19/iss3/art54/> (дата обращения: 01.09.2020).
29. **Mushtaq, B.** Environmental Education and Environmental Impact Assessment / B. Mushtaq, S. A. Bandh, S. Shafi. – DOI 10.1007/978-981-15-3813-1_3 // Environmental Management. – Singapore : Springer, 2020. – Pp. 95–148. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-15-3813-1_3#citeas (дата обращения: 01.09.2020).
30. **Якунин, Д. А.** Прогнозы воздействия изменения климата на сельское хозяйство в Нижнем Поволжье / Д. А. Якунин, С. М. Мусаелян // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2011. – № 2 (22). – С. 80–86. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16452689> (дата обращения: 01.09.2020).
31. Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges / A. Yu. Briukhanov, A. V. Trifanov, A. V. Spesivtsev [et al.]. – DOI 10.1109/SCM.2016.7519716 // 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – St. Petersburg : IEEE, 2016. – Pp. 164–166. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7519716/metrics#metrics> (дата обращения: 01.09.2020).
32. Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве / А. Ю. Брюханов, И. А. Субботин, Е. В. Тимофеев, А. Ф. Эрк. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201903.366-382 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 366–382. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/715-10-15507-0236-2910-029-201903-3> (дата обращения: 01.09.2020).

Поступила 02.09.2020; одобрена после рецензирования 21.10.2020; принята к публикации 06.11.2020

Об авторах:

Субботин Игорь Александрович, научный сотрудник отдела инженерной экологии сельскохозяйственного производства Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филитровское ш., д. 3), Researcher ID: L-6130-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-9385>, itmo1652@mail.ru

Васильев Эдуард Вадимович, старший научный сотрудник отдела инженерной экологии сельскохозяйственного производства Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филитровское ш., д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: C-1304-2018, sznii6@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. А. Субботин – литературный обзор, методика, результаты, обсуждение, выводы.
Э. В. Васильев – формулировка и постановка задачи, определение критериев и сбор экспертных данных, обсуждение, выводы.

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bayramukova S.R., Mesharova V.Yu. [The Impact of Agricultural Enterprises on the Environment]. *Strategiya ustoychivogo razvitiya regionov Rossii* = Strategy for Sustainable Development of Russian Regions. 2015; (29):52-55. Available at: <https://clck.ru/U2G3o> (accessed 01.09.2020). (In Russ.)
2. Stepanova L.P., Tsyganok Ye.N., Tikhoykina I.M. [Ecological Problems of Agriculture]. *Vestnik OrelGAU* = Vestnik OrelGAU (Bulletin of Agrarian Science). 2012; (1):11-17. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-zemledeliya> (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Afanassiev V.N., Kozlova N.P., Afanassiev A.V. Reducing Negative Environmental Impact of Machine-Based Technologies in Agriculture. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means for Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2013; (84):133-141. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22677100> (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Popov V.D., Maksimov D.A., Bryukhanov A.Yu. Agricultural Production Ecology: Problems and Solutions. *Selskhozajstvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2016; (3):43-48. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/138> (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Werf H.M.G., Petit J. Evaluation of the Environmental Impact of Agriculture at the Farm Level: A Comparison and Analysis of 12 Indicator-Based Methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2002; 93(1-3):131-145. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00354-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00354-1)
6. Nootboom S., Wieringa K. Comparing Strategic Environmental Assessment and Integrated Environmental Assessment. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*. 2012; 1(4):441-457. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1142/S146433329900034X>
7. Agelebe D., Prityi M., Nielsen J. Environmental Impact Assessment Systems. In: K.W. Junker, ed. *Environmental Law Across Cultures*. 1st ed. London: Routledge; 2019. 41 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429397615>
8. Orlova I.V., Sharabarina S.N. [Assessment of Agricultural Impact on Natural Systems: Theoretical and Methodological Approaches]. *Geografiya i prirodnye resursy* = Geography and Natural Resources. 2015; (4):26-32. Available at: http://www.izdatgeo.ru/journal.php?action=output_more&id=3&lang_num=1&year=2015&issue=4&nodei=1&page=26 (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Canter L.W. *Environmental Impact of Agricultural Production Activities*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press; 1986. 400 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351071796>
10. Fletcher P., Kelble Ch., Nuttle W., Kiker G. Using the Integrated Ecosystem Assessment Framework to Build Consensus and Transfer Information to Managers. *Ecological Indicators*. 2014; 44:11-25. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.024>
11. Brentrup F., Küsters J., Kuhlmann H., Lammel J. Environmental Impact Assessment of Agricultural Production Systems Using the Life Cycle Assessment Methodology: I. Theoretical Concept of a LCA Method Tailored to Crop Production. *European Journal of Agronomy*. 2004; 20(3):247-264. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00024-8)
12. Bryukhanov A.Yu., Shalavina Ye.V., Vasilev E.V., Oblomkova N.S. Indicators of Negative Environmental Impact in Agri-Food Production. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means for Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2019; (2):250-260. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10170>
13. Sousa P., Gomes D., Formigo N. Ecosystem Services in Environmental Impact Assessment. *Energy Reports*. 2020; 6(1):466-471. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.009>
14. Wu J., Chang I.-S. Environmental Impact Assessment. In: *Environmental Management in China*. Singapore: Springer; 2020. p. 35-62. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4894-9_4
15. Su D., Smith J., Wu Y., Ren Z. Environmental Impact Assessment of Farming with Combined Methods of Life Cycle Assessment and Farm Carbon Calculator. In: D. Su, ed. *Sustainable Product*

Development. Cham: Springer; 2020. p. 249-270. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39149-2_12

16. Gomiero T., Pimentel D., Paoletti M.G. Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2011; 30(1-2):95-124. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554355>

17. Ferro V. Soil Sediment Loading and Related Environmental Impacts from Farms. In: Oxford Research Encyclopedias. 2017. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.267>

18. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N., et al. Environmental Assessment of Livestock Farms in the Context of BAT System Introduction in Russia. *Journal of Environmental Management*. 2019; 246:283-288. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.105>

19. Li Y. Agricultural Production Mode and Its Environmental Impact. In: Y. Zhang, ed. Environmental Economics Research and China's Green Development Strategy. 2020. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1142/9789811202919_0006

20. Karayel D., Sarauskis E. Environmental Impact of No-Tillage Farming. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2019; 75(1). 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.erem.75.1.20861>

21. Gridnev P.I., Gridneva T.T., Shvedov A.A. Methodology of Manure Cleaning and Preparation for Using Systems' Ecological Assessment. *Vestnik VNIIMZh = Journal of VNIIMZH*. 2018; 2:159-167. Available at: <http://www.vniimzh.ru/images/material/Magazines/n30.pdf> (accessed 01.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)

22. Briukhanov A.Yu., Trifanov A.V., Spesivtsev A.V., et al. Logical-Linguistic Model of Farm Organic Waste Recycling. In: 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Petersburg: IEEE; 2017. p. 265-267. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970556>

23. Peigné J., Girardin P. Environmental Impacts of Farm-Scale Composting Practices. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2004; 153:45-68. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000019932.04020.b6>

24. Safa G., Najiba C., El Houda B.N., et al. Assessment of Urban Groundwater Vulnerability in Arid Areas: Case of Sidi Bouzid Aquifer (Central Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*. 2020; 168. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103849>

25. Novikov N.N., Sorokin N.T., Grachev N.N., et al. Environmental Hazards and Labour Protection in Agriculture with the Organic Farming Development: A Model of Integrated Assessment. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie = South of Russia: Ecology, Development*. 2019; 14(2):99-119. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-2-99-119>

26. Mulyk T. Environmental Impact Assessment of Agriculture: A Regional Aspect. *Modern Economics*. 2020; 19:135-142. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V19\(2020\)-22](https://doi.org/10.31521/modecon.V19(2020)-22)

27. Li Sh., Huang B., Zhao F., et al. Environmental Impact Assessment of Agricultural Production in Chongming Ecological Island. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2019; 24:1937-1947. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01614-w>

28. O'Higgins T., Farmer A., Daskalov G., et al. Achieving Good Environmental Status in the Black Sea: Scale Mismatches in Environmental Management. *Ecology and Society*. 2014; 19(3):54. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5751/ES-06707-190354>

29. Mushtaq B., Bandh S.A., Shafi S. Environmental Education and Environmental Impact Assessment. In: Environmental Management. Singapore: Springer; 2020. p. 95-148. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3813-1_3

30. Yakunin D.A., Musaelyan S.M. [Projections of Climate Change Impacts on Agriculture in the Lower Volga Region]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie = News of the Nizhnevolzhsk Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2011; (2):80-86. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16452689> (accessed 01.09.2020). (In Russ.)

31. Briukhanov A.Yu., Trifanov A.V., Spesivtsev A.V., et al. Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges. In: 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing

and Measurements (SCM). St. Petersburg: IEEE; 2016. p. 164-166. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519716>

32. Briukhanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev E.V., Erk A.F. Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):366-382. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>

Submitted 02.09.2020; approved after reviewing 21.10.2020; accepted for publication 06.11.2020

About the authors:

Igor A. Subbotin, Researcher at the Department of Engineering Ecology of Agricultural Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Researcher ID: L-6130-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-9385>, itmo1652@mail.ru

Eduard V. Vasilev, Senior Researcher at the Department of Engineering Ecology of Agricultural Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: C-1304-2018, sznii6@yandex.ru

Contribution of the authors:

I. A. Subbotin – literature review, methodology, results, discussion and conclusions.

E. V. Vasilev – formulating the problems, setting the objectives, defining the criteria, collecting expert data, discussing and making conclusions.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the anonymous reviewers.

All authors have read and approved the final manuscript.