

ISSN 1029-8940 (Print)  
ISSN 2524-230X (Online)  
УДК 574.2:539.16.04  
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-3-237-248>

Поступила в редакцию 14.02.2024  
Received 14.02.2024

А. Н. Никитин<sup>1</sup>, М. В. Кудин<sup>2</sup>, С. А. Калиниченко<sup>2</sup>, Т. В. Ласько<sup>3</sup>,  
О. А. Шуранкова<sup>3</sup>, Е. В. Мищенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, г. Хойники, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

## ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗА НАКОПЛЕНИЯ <sup>137</sup>Cs ДРЕВЕСНЫМИ РАСТЕНИЯМИ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ КУЛЬТУРАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РЕШАЮЩИХ ДЕРЕВЬЕВ

**Аннотация.** Изучены закономерности накопления <sup>137</sup>Cs в стволовой древесине сосновых насаждений и в урожае сельскохозяйственных культур с использованием метода градиентного бустинга на решающих деревьях и SHAP-анализа. Для сосновых насаждений в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС выявлена нелинейная связь коэффициента перехода с высотой над уровнем моря, а также с вегетационными индексами, указывающими на общее состояние насаждений, их биологическую продуктивность и обеспеченность калием. В агроэкосистемах на территории Гомельской и Могилевской областей подтверждено влияние на коэффициент перехода вида растения и концентрации K<sup>+</sup> в почвенном растворе. Использование интерпретируемого метода машинного обучения позволило определить характер влияния дефицита почвенной влаги на накопление <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственными растениями, а также показать сохранение вклада трансфолиарного поступления радионуклида при низких уровнях загрязнения почвы на этапе отдаленных последствий радиоактивных выпадений. Применение метода градиентного бустинга на решающих деревьях и интерпретация модели с помощью SHAP-анализа обеспечили более глубокое понимание сложных взаимосвязей факторов, влияющих на поступление <sup>137</sup>Cs в растения, что открывает перспективы для повышения точности прогноза загрязнения растительных ресурсов радионуклидами.

**Ключевые слова:** экологические факторы, почвенно-растительная система, цезий-137, вегетационные индексы, машинное обучение, решающие деревья, SHAP-анализ

**Для цитирования:** Построение прогноза накопления <sup>137</sup>Cs древесными растениями и сельскохозяйственными культурами с использованием метода решающих деревьев / А. Н. Никитин [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 237–248. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-3-237-248>

Aleksander N. Nikitin<sup>1</sup>, Maksim V. Kudin<sup>2</sup>, Sergey A. Kalinichenko<sup>2</sup>, Tamara V. Lasko<sup>3</sup>,  
Olga A. Shurankova<sup>3</sup>, Egor V. Mishchanka<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Polesie State Radioecological Reserve, Choiniki, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

## FORECASTING THE ACCUMULATION OF <sup>137</sup>Cs BY TREES AND CROPS USING THE DECISION TREE METHOD

**Abstract.** The article provides a profound analysis of the accumulation of the radionuclide <sup>137</sup>Cs in the stems of pine trees and harvest of crops, employing decision tree methods and SHAP analysis. In pine forests situated in the Chernobyl exclusion zone, a nonlinear relationship between the aggregated transfer factor and elevation above sea level is identified, along with the influence of vegetation indices pointing to overall stand condition, biological productivity, and potassium deficiency. In agroecosystems situated in Gomel and Mogilev regions, the impact of plant species, K<sup>+</sup> concentration in the soil solution on aggregated transfer factor is confirmed. Interpretable machine learning method shows dependence of aggregated transfer factor from soil moisture and the persistence of transfoliar contamination at low soil pollution levels at late stage after Chernobyl catastrophe. The application of decision trees and SHAP analysis offers a deeper understanding of complex interactions in the “soil-plant” system, opening perspectives for effective monitoring and management of radioactive contamination in diverse natural and agricultural environments.

**Keywords:** ecological factors, soil-plant system, cesium-137, vegetation indices, machine learning, decision trees, SHAP-analysis

**For citation:** Nikitin A. N., Kudin M. V., Kalinichenko S. A., Lasko T. V., Shurankova O. A., Mishchanka E. V. Forecasting the accumulation of <sup>137</sup>Cs by trees and crops using the decision tree method. *Vesti Natsyyanal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 237–248 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-3-237-248>

**Введение.** Выявление и количественное описание эффектов воздействия отдельных экологических факторов на различные параметры состояния экосистем представляет собой сложную задачу в силу одновременного влияния всего комплекса условий окружающей среды и их изменения во времени и пространстве. Эдафические, климатические, биотические и антропогенные факторы имеют разную силу и направленность влияния на определяемый показатель, а их эффект может зависеть от этапа вегетационного периода, исходного состояния экосистемы и воздействия других факторов. Задачу осложняют корреляционные связи различной силы между экологическими факторами.

Одним из подходов к решению данной задачи является постановка экспериментов с созданием условий, в которых изменяется только один из факторов. Сильной стороной данного подхода является возможность однозначной интерпретации эффекта воздействия изучаемого фактора. Однако постановка подобных экспериментов предполагает наличие априорных знаний о силе влияния всех экологических факторов и отбор наиболее существенных. Для получения ответа на вопрос о взаимодействии двух факторов требуется значительное увеличение количества вариантов опыта, а взаимодействие трех и более факторов исследовать практически невозможно. Особую сложность представляет создание моделей естественных экосистем для проведения подобных экспериментов.

Наблюдения за естественными экосистемами или производственными посевами позволяют получить информацию об изменении целевого параметра их состояния в ответ на действие комплекса экологических факторов при минимальных затратах. Однако интерпретация данной информации, выделение факторов, оказывающих существенное влияние, поиск эффектов взаимодействия факторов, построение количественных моделей являются сложными задачами. Для их решения целесообразно использовать методы машинного обучения, допускающие возможность интерпретации построенной модели.

Решающие деревья (decision trees) являются семейством моделей машинного обучения, работа которых основана на построении набора применяемых к входным параметрам последовательных двузначных правил, позволяющих оценить значение целевой переменной. Решающие деревья применяются для решения задач как классификации, так и регрессии. Несмотря на кажущуюся простоту, использование ансамблей решающих деревьев позволяет решать сложные задачи и обеспечивать максимально возможную точность прогноза. В случае большого количества входных параметров и существенного шума в данных ансамбли решающих деревьев часто оказываются единственным работающим подходом. Еще одним преимуществом методов, базирующихся на решающих деревьях, является простота интерпретации работы моделей. Данное обстоятельство позволяет использовать их не только для прогноза целевой переменной, но и для раскрытия закономерностей влияния входных параметров на ее значение.

Одним из наиболее мощных вариантов моделей рассматриваемого семейства является градиентный бустинг на решающих деревьях. В нем реализована идея последовательной линейной комбинации алгоритмов. При этом каждый последующий алгоритм нацелен на уменьшение ошибок предыдущего. Данный метод способен находить сложные нелинейные взаимосвязи между переменными различной природы, что делает его подходящим для решения задачи исследования – определения влияния комплекса экологических факторов на целевой параметр состояния экосистемы.

Различные варианты метода решающих деревьев находят свое применение в экологических исследованиях. Его применяют для моделирования динамики и пространственной структуры популяций [1]. В работе [2] показано, что метод решающих деревьев позволяет построить более точную модель годовой и сезонной продуктивности луговых экосистем по сравнению с регрессионными моделями. На примере биомассы фитопланктона некоторых речных экосистем Китая были показаны преимущества метода случайных деревьев для выявления основных экологических факторов, влияющих на этот параметр состояния экосистемы [3]. В этом же исследовании для описания характера влияния отобранных факторов на биомассу фитопланктона был использован SHAP-анализ.

В исследовании [4] метод градиентного бустинга на решающих деревьях был успешно применен для построения модели баланса углерода в различных экосистемах и для отбора наиболее

значимых климатических факторов, влияющих на него. Аналогичный подход был использован для прогноза зараженности (на основании характеристик воды) устриц болезнетворными бактериями *Vibrio parahaemolyticus* [5] и распространенности (в зависимости от климатических факторов) листерии в пастбищных экосистемах [6]. Метод градиентного бустинга на решающих деревьях в комбинации с различными техниками интерпретации моделей был успешно применен в исследовании экологии бентосных беспозвоночных в водоемах США [7].

Прогноз перехода радиоактивных изотопов Cs из почвы в растения является довольно сложной задачей в связи с динамичным изменением их распределения по формам нахождения в почве и с зависимостью их корневого поступления от обеспеченности растений калием [8]. Вместе с тем от надежности данного прогноза зависит эффективность защитных мер, применяемых на загрязненных радионуклидами территориях. Согласно нашей гипотезе, использование метода решающих деревьев с интерпретацией полученных моделей с помощью SHAP-анализа позволит выявить особенности влияния основных экологических факторов на накопление  $^{137}\text{Cs}$  растениями лесных экосистем и агроэкосистем на этапе отдаленных последствий чернобыльской катастрофы. До настоящего времени подобный подход не использовался в радиоэкологических исследованиях.

Цель настоящей работы – оценка возможности использования метода градиентного бустинга на решающих деревьях для анализа эффектов воздействия различных экологических факторов на коэффициент перехода  $^{137}\text{Cs}$  в древесные растения и сельскохозяйственные культуры.

**Объекты и методы исследования.** Данные по накоплению  $^{137}\text{Cs}$  сельскохозяйственными культурами сформированы по результатам анализа растительных образцов, отобранных в 2019–2020 гг. в фазы технической спелости в производственных посевах методом учетных площадок, и сопряженных образцов почвы. Подбор сельскохозяйственных предприятий для отбора образцов осуществляли исходя из плотности загрязнения территории и структуры посевных площадей в наиболее загрязненных районах Гомельской и Могилевской областей. Всего набор данных включает 271 наблюдение. В число обследованных культур вошли: люцерна, клевер, тимофеевка, сурепица, сурепка, лядвенец, овес (зерно и зеленая масса), кукуруза (зерно и зеленая масса), ячмень (зерно), озимая рожь (зерно), озимая пшеница (зерно) и яровая пшеница (зерно), морковь, картофель, лук (перо и репка), свекла столовая и свекла кормовая, горох (зерно и зеленая масса), пайза, озимая тритикале, подсолнечник (семена и зеленая масса), гречиха, лен (семя и волокно), просо (зерно и зеленая масса), бобово-злаковые смеси и злаковые смеси. По каждой культуре пробы были отобраны на 3–33 участках. Образцы отбирали преимущественно на супесчаных и песчаных почвах, 12 участков имели суглинистую почву, на почвах органического происхождения было заложено 15 участков.

Данные по накоплению  $^{137}\text{Cs}$  в неокоренной древесине сосны собраны на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) в 2011–2022 гг. Для обследования отбирали насаждения спелого и приспевающего классов возраста. Закладку временных пробных площадей и их описание выполняли в соответствии с общепринятыми методами [9]. Отбор образцов почвы и древесины осуществляли в соответствии с [10]. Всего набор данных включал 1033 наблюдения. Распределение пробных площадей по типам леса и типам лесорастительных условий соответствовало типологической структуре ПГРЭЗ. Практически 2/3 составляли сосняки мшистые, на черничные приходилось 15,2 % пробных площадей, на орляковые – 10,8, на вересковые – 4,7, на кисличные – 1,9, на лишайниковые, брусничные, папоротниковые, снытевые, длинномошные и таволговые – менее 1 %. На тип лесорастительных условий  $A_2$  приходилось 70,4 % пробных площадей, на тип  $B_3$  – 13,8, на тип  $B_2$  – 10,8, на типы  $C_2$  и  $A_3$  – менее 1,5 %.

Плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  на пробных площадях в сосновых экосистемах варьировалась от 33 до 10 496 кБк/м<sup>2</sup> (среднее арифметическое – 559 кБк/м<sup>2</sup>), а удельная активность радионуклида в отобранных образцах неокоренной древесины составляла 18–34 214 Бк/кг (среднее арифметическое – 1 120 Бк/кг). Критериями возможности заготовки древесины для различных целей являлись уровни 740 и 1 480 Бк/кг (РДУ/ЛХ-2001), которым отвечало 68,4 и 86,7 % обследованных участков соответственно.

В отобранных образцах почвы определяли основные агрохимические показатели: содержание органического вещества, pH в солевой вытяжке, содержание подвижных калия и фосфора, содержание обменных аммония, кальция и магния, гидrolитическую кислотность, обменную емкость и степень насыщенности основаниями [11]. Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  в отобранных образцах почвы и растений определяли с помощью  $\gamma$ -спектрометрического комплекса Canberra на основе полупроводникового Ge(Li) коаксиального детектора с расширенным энергетическим диапазоном, используя стандартные подходы [12]. Коэффициент перехода (Кп)  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в анализируемые органы растений рассчитывали как отношение удельной активности радионуклида в высушенном до воздушно-сухого состояния образце растения к плотности загрязнения почвы данным радионуклидом:  $(\text{Бк/кг}):(\text{кБк/м}^2)$  или  $\times 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Поскольку доля глинистой фракции в механическом составе почвы непосредственно не определялась, было принято, что в песчаных почвах она составляет 5 %, в супесчаных – 15, в суглинистых – 30 %. Концентрации  $\text{K}^+$  и  $\text{Cs}^+$  в почвенном растворе оценивали с использованием моделей [13] и [13–15] соответственно.

Для оценки состояния лесных экосистем использовали данные дистанционного зондирования Sentinel-2 [16] уровня 2A, цифровая модель поверхности [17]. Для анализа спектрального отклика полога лесных экосистем данные Sentinel-2 были отобраны из области интереса – в круге радиусом 40 м, центрированном относительно центра пробной площадки. С целью получения более однородной выборки данных по спектральной светимости участков для анализа отобраны снимки Sentinel-2 за июнь 2018 г. В анализ отбирали только те снимки, для которых вероятность облачного покрова в радиусе 5 км вокруг области интереса составляла менее 3 %. В качестве исходного набора входных параметров модели использованы следующие вегетационные индексы: NDVI, EVI, GNDVI, CVI, NDWI, SAVI, ARVI, MSAVI2, MSARVI2, NDSI<sup>3-4</sup>, RVI, DVI, VARI, CMR, FMR, BAI, COMVI<sup>3-5-2-4-11</sup>. Анализировали среднее и максимальное значения, а также среднеквадратичное отклонение данных индексов в области интереса.

Содержание влаги в верхнем слое почвы сельскохозяйственных угодий оценивали с помощью данных дистанционного зондирования SMAP [18] с пространственным разрешением 9 км. Использовали медианы влажности верхнего 5-сантиметрового слоя почвы (доля от полной влагоемкости) с апреля по август, отдельно в первых двух декадах июня и в третьей декаде июня.

Для моделирования зависимости Кп от факторов окружающей среды использовали метод градиентного бустинга на решающих деревьях в реализации LightGBM [19]. Стратегия построения модели включала следующие этапы:

1. Отбор параметров, позволяющих снизить неопределенность модели. На первом шаге в число параметров модели включали все анализируемые факторы. На следующих шагах производилось обучение модели и параметры последовательно исключали. Критерием исключения параметра являлось минимальное уменьшение среднеквадратичной ошибки модели, обученной без него.

2. Оптимизация гиперпараметров модели методом байесова поиска [20] с использованием пакета Bayesian Optimization для Python.

3. Построение финальной версии модели градиентного бустинга на решающих деревьях, использующей отобранные входные параметры.

4. Анализ влияния отдельных факторов на Кп с использованием метода SHapley Additive exPlanations (SHAP) в реализации [21, 22]. Данный метод, основанный на теории игр, определяет влияние каждого из параметров модели на результат, что позволяет провести графический анализ особенностей воздействия каждого из факторов на определяемую величину. Для анализа взаимного влияния двух факторов использовали цветовое кодирование. Синим цветом обозначали низкие значения дополнительного параметра, красным – высокие.

Для оценки точности модели использовали подход Leave-One-Out. Для предупреждения переобучения модели использовали раннюю остановку на основании динамики изменения ошибки на случайно отобранной тестовой выборке, составлявшей 30 % от объема данных.

**Результаты и их обсуждение.** *Лесные экосистемы.* Кп  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в неокоренную древесину сосны на обследованных пробных площадях варьируются в широком диапазоне –

от  $0,07 \cdot 10^{-3}$  до  $19,01 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$  со средним значением  $2,19 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$  и медианой  $1,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ . Высокая вариабельность показателя накопления характерна также для типов леса и типов лесорастительных условий. Это указывает на то, что разработанные для лесохозяйственной деятельности системы лесной классификации не в полной мере отражают изменение комплекса факторов, влияющих на поведение  $^{137}\text{Cs}$  в системе «почва–растение» в условиях ПГРЭЗ, где не ведется уход за лесом.

Мультиспектральные данные дистанционного зондирования Земли сегодня широко используются для оперативного анализа состояния растительного и почвенного покрова. Из спектрального отклика крон сосновых экосистем может быть выделена информация для оценки различных параметров состояния насаждения. Наиболее распространенным методическим подходом при этом является расчет вегетационных индексов, связанных с той или иной характеристикой растительного покрова. Различные вегетационные индексы (средние, максимальные значения и их среднеквадратичные отклонения в пределах пробной площади) в настоящей работе используются в качестве входных параметров модели решающих деревьев.

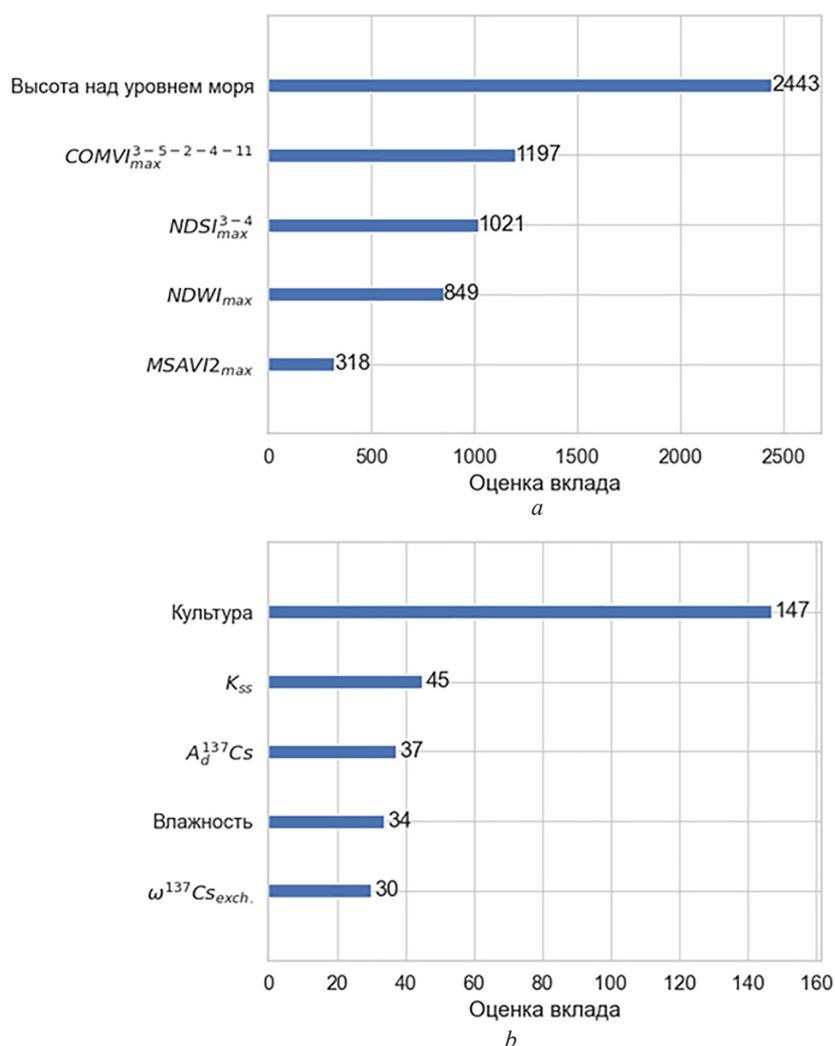


Рис. 1. Значимость факторов в моделях коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в неокоренную древесину сосны (a) и урожай сельскохозяйственных культур (b).  $COMVI_{max}^{3-5-2-4-11}$ ,  $NDSI_{max}^{3-4}$ ,  $NDWI_{max}$ ,  $MSAVI2_{max}$  – максимальные значения соответствующих вегетационных индексов;  $K_{ss}$  – концентрация  $\text{K}^+$  в почвенном растворе, моль/л;  $A_d^{137}\text{Cs}$  – плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м<sup>2</sup>;  $\omega^{137}\text{Cs}_{exch.}$  – доля  $^{137}\text{Cs}$  в ионообменной форме, %

Fig. 1. Significance of factors in the models of the  $^{137}\text{Cs}$  aggregated transfer factor from soil to pine logs (a) and crop yield (b).  $COMVI_{max}^{3-5-2-4-11}$ ,  $NDSI_{max}^{3-4}$ ,  $NDWI_{max}$ ,  $MSAVI2_{max}$  – maximum values of the relevant vegetation indices;  $K_{ss}$  –  $\text{K}^+$  concentration in the soil solution, mol/l;  $A_d^{137}\text{Cs}$  – contamination density of the soil with  $^{137}\text{Cs}$ , kBq/m<sup>2</sup>;  $\omega^{137}\text{Cs}_{exch.}$  – fraction of  $^{137}\text{Cs}$  in ion exchangeable form, %

На первом этапе отобраны параметры с наиболее существенным вкладом в результат моделирования:  $Elevation_{mean}$  – средняя высота участка над уровнем моря,  $COMVI_{max}^{3-5-2-4-11}$  – максимальное значение разработанного авторами исследования вегетационного индекса [23],  $NDSI_{max}^{3-4}$  – максимальное значение нормализованного разностного спектрального индекса (зеленый-красный),  $NDWI_{max}$  – максимальное значение нормализованного разностного индекса увлажнения,  $MSAVI2_{max}$  – максимальное значение измененного вегетационного индекса с поправкой на почву.

Относительный вклад данных параметров в модель представлен на рис. 1, а. Результаты показывают, что высота участка над уровнем моря оказывает наиболее сильное влияние на Кп с большим отрывом от вклада вегетационных индексов.

Изучение влияния высоты над уровнем моря на Кп для условий ПГРЭЗ (рис. 2, а) показало, что наиболее низкие значения этого показателя (на 0,4–0,8 ниже среднего) наблюдаются на участках, расположенных на высоте 130–140 м. На пониженных участках (ниже 130 м) происходит резкое увеличение Кп. При высоте более 140 м Кп ниже на 0,2–0,4 единицы среднего по породе значения. Высота над уровнем моря отражает положение лесной экосистемы на элементе рельефа. Участки на повышенных элементах испытывают дефицит влаги, на пониженных – расположены на гидроморфных и полугидроморфных почвах.

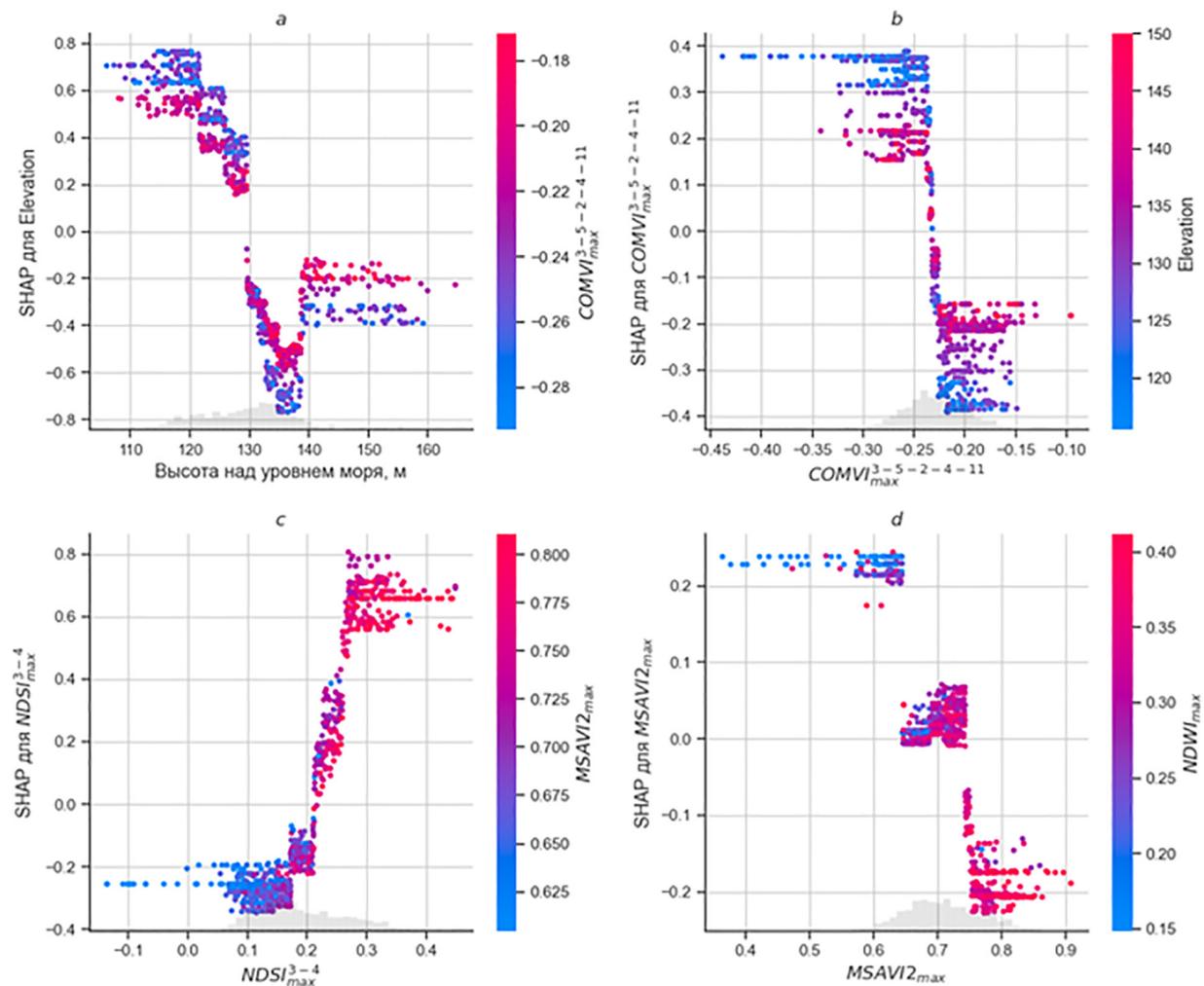


Рис. 2. Оценка связи высоты над уровнем моря и отобранных вегетационных индексов с коэффициентом перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в неокоренную древесину сосны на основании анализа SHAP

Fig. 2. Assessing the relationship between elevation above sea level and selected vegetation indices with the  $^{137}\text{Cs}$  aggregated transfer factor from soil to pine logs based on the SHAP analysis

На фоне влияния других параметров модели Кп резко увеличивается при значениях индекса  $\text{COMVI}^{3-5-2-4-11}_{\max}$  менее  $-0,24$  (рис. 2, *b*). Низкие значения индекса  $\text{COMVI}^{3-5-2-4-11}$  должны свидетельствовать о дефиците калия в почве. Поскольку дефицит калия является одним из известных факторов увеличения интенсивности поглощения изотопов цезия растениями, обнаруженная связь вполне согласуется с современными представлениями о поведении  $^{137}\text{Cs}$  в системе «почва–растение». Анализ SHAP позволяет выявить взаимодействие между различными факторами. В частности, из рис. 2, *b* видно, что при высоте участков более 135 м над уровнем моря взаимосвязь Кп с индексом  $\text{COMVI}^{3-5-2-4-11}_{\max}$  менее существенная – размах значений Кп составляет около 0,4 ед., тогда как на пониженных участках размах Кп при изменении анализируемого вегетационного индекса составляет около 0,8 ед.

Индекс  $\text{NDSI}^{3-4}$  (нормализованный разностный спектральный индекс зеленый–красный) связан с плотностью растительного покрова и плотностью фотосинтетических органов на единицу поверхности почвы.  $\text{NDSI}^{3-4}_{\max} > 0,26$  приводит к росту Кп на 0,6 ед. и более выше среднего по породе значения (рис. 2, *c*). В разреженных насаждениях при  $\text{NDSI}^{3-4}_{\max} < 0,18$  Кп несколько ниже средних значений. Вероятно, более острая внутривидовая конкуренция за ресурсы, включая калий, в перегушенных насаждениях приводит к сильному увеличению интенсивности накопления  $^{137}\text{Cs}$  в стволовой древесине сосны.

Измененный вегетационный индекс с поправкой на почву ( $\text{MSAVI2}$ ) является альтернативой более распространенному нормализованному разностному вегетационному индексу ( $\text{NDVI}$ ). Он позволяет более точно оценить состояние фотосинтетического аппарата и биологическую продуктивность растительного покрова, особенно если в области интереса имеются свободные от растений участки. Все обследованные сосняки можно разделить на три группы на основании связи индекса  $\text{MSAVI2}_{\max}$  с Кп (рис. 2, *d*). При его значении от 0,63 до 0,73 Кп близок к среднему для породы значению. Однако при пониженных значениях  $\text{MSAVI2}_{\max}$ , характерных для лесных экосистем с низкой биологической продуктивностью, уровень накопления  $^{137}\text{Cs}$  в стволовой древесине сосны возрастает. В наиболее продуктивных сосновых насаждениях при  $\text{MSAVI2}_{\max} > 0,75$  Кп на 0,1–0,2 ед. меньше среднего для породы значения.

Вегетационный индекс  $\text{NDWI}$  указывает на содержание воды в фотосинтетическом аппарате. Его снижение происходит при недостаточной влагообеспеченности. На рис. 2, *d* видна положительная связь между  $\text{MSAVI2}_{\max}$  и  $\text{NDWI}_{\max}$ . Это указывает на то, что достаточная влагообеспеченность, поддерживающая высокую биологическую продуктивность лесной экосистемы, снижает Кп  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в стволовую древесину сосны.

*Агрэкоэкосистемы.* Кп  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в урожай сельскохозяйственных культур на обследованных участках составил  $(0,003\text{--}7,204) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ . На почвах органического происхождения Кп был приблизительно на порядок выше, чем на минеральных. На почвах минерального происхождения вариабельность Кп составляла  $(0,003\text{--}0,778) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ . Из дальнейшего анализа наблюдения на почвах органического происхождения были исключены, поскольку закономерности поведения  $^{137}\text{Cs}$  в системе «почва–растение» на них сильно отличаются от таковых в почвах минерального происхождения. Известно, что Кп в значительной мере зависит от культуры и той части растения, в которой определяется содержание радионуклида. Но и для одной культуры или части растения значения Кп могут сильно различаться. Коэффициент вариации Кп в пределах культуры составляет, как правило, 40–60 %.

Отбор наиболее значимых факторов в модели решающих деревьев позволил установить, что на этапе отдаленных последствий выпадения радиоактивных веществ ведущими факторами, влияющими на Кп  $^{137}\text{Cs}$  в исследуемые культуры, являются (в порядке убывания значимости): сельскохозяйственная культура > концентрация калия в почвенном растворе > плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  > влажность почвы в первых двух декадах июня > доля  $^{137}\text{Cs}$  в почве в ионообменной форме (см. рис. 1, *b*).

Среднеквадратичная ошибка оценки Кп  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в сельскохозяйственные культуры с использованием построенной модели после отбора наиболее значимых параметров составила  $0,351 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ ; коэффициент детерминации ( $R^2$ ) – 0,400. Включение в модель только наиболее значимых параметров позволило не только упростить, но и повысить ее точность. В случае

построения модели по полному исходному набору факторов среднеквадратичная ошибка и  $R^2$  составили 0,460 и 0,216 соответственно.

Как показал анализ влияния количественных параметров модели на Кп  $^{137}\text{Cs}$  в урожай (рис. 3), наиболее существенное влияние на Кп оказывает культура (качественный параметр), при этом показатели SHAP указывают на то, как изменяется Кп при различных значениях того или иного фактора относительно среднего его значения для культуры на фоне влияния других количественных факторов.

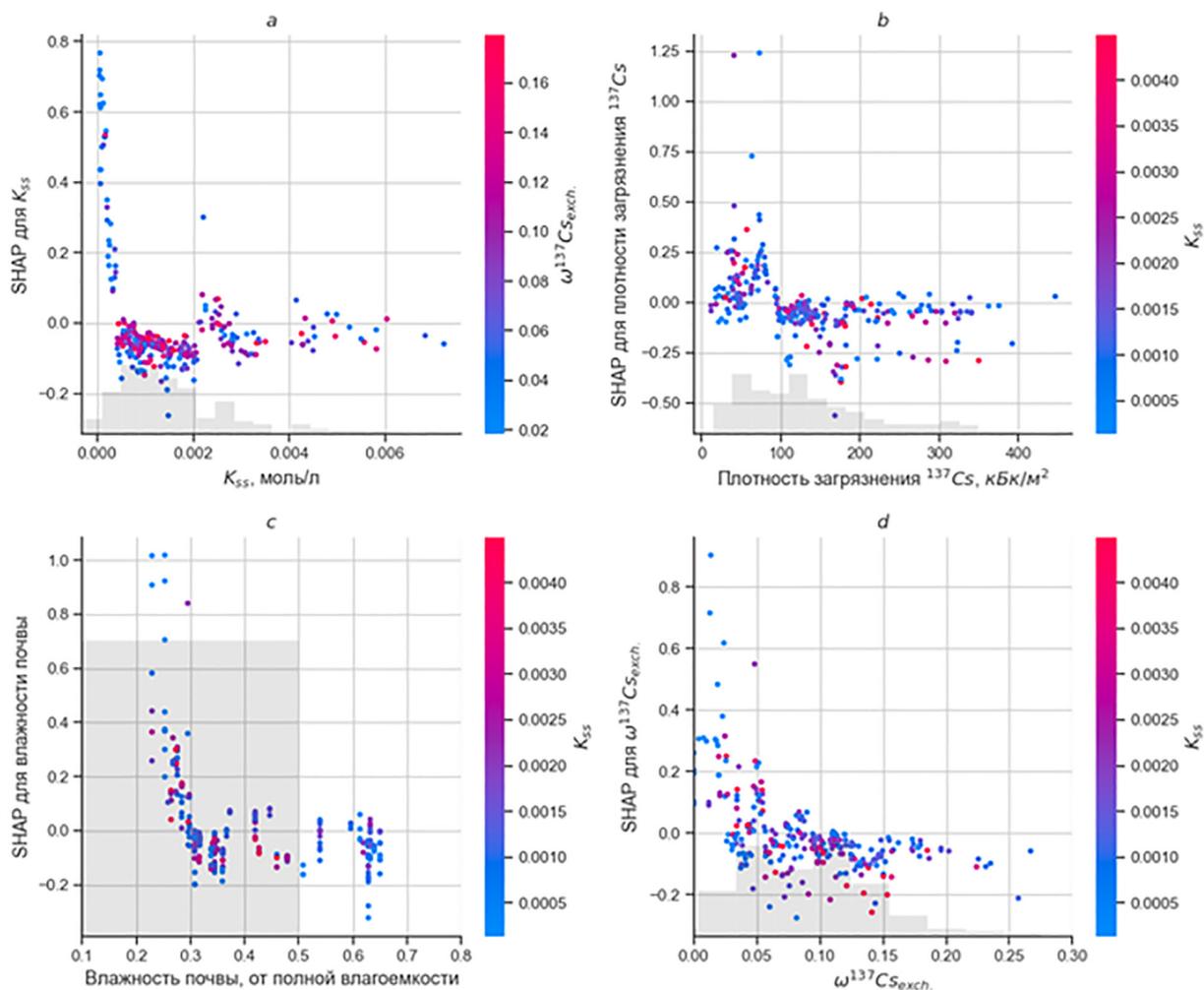


Рис. 3. Оценка связи параметров модели с коэффициентом перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в урожай сельскохозяйственных культур.  $K_{ss}$  – концентрация  $\text{K}^+$  в почвенном растворе, моль/л;  $\omega^{137}\text{Cs}_{\text{exch}}$  – доля ионообменной формы  $^{137}\text{Cs}$  в почве от его валового запаса

Fig. 3. Evaluating the relationship between the model parameters and the  $^{137}\text{Cs}$  aggregated transfer factor from soil to crops in agricultural ecosystems.  $K_{ss}$  –  $\text{K}^+$  concentration in the soil solution, mol/L;  $\omega^{137}\text{Cs}_{\text{exch}}$  – fraction of  $^{137}\text{Cs}$  in ion-exchangeable form in the soil with respect to its total content

Второй по значимости фактор – содержание  $\text{K}^+$  в почвенном растворе – влияет на Кп только при его значении ниже 1 ммоль/л. Увеличение концентрации  $\text{K}^+$  от минимальных наблюдаемых значений до 1 ммоль/л приводит к резкому падению Кп (рис. 3, а). При значении этого параметра выше 1 ммоль/л Кп близок к средним для культуры значениям. Наблюдаемая закономерность хорошо согласуется с современными представлениями о механизмах корневого поступления радиоактивных изотопов Cs в растения [24]. Заметное увеличение Кп при развитии дефицита калия обусловлено активацией переносчика  $\text{K}^+$  НАК-типа, имеющего высокую степень родства с  $\text{Cs}^+$ .

Традиционно для оценки обеспеченности растений калием определяют содержание этого макроэлемента в подвижной или ионообменной форме. При замене концентрации  $K^+$  в почвенном растворе на концентрацию его ионообменной формы точность модели падает (среднеквадратичная ошибка – 0,380;  $R^2$  – 0,351). В настоящей работе концентрацию  $K^+$  в почвенном растворе оценивали не непосредственно, а на основании обычных параметров (механический состав, содержание органического вещества, содержание обменного калия), определяемых при почвенном обследовании, что позволяет рекомендовать именно концентрацию  $K^+$  в почвенном растворе для прогноза перехода  $^{137}Cs$  в сельскохозяйственные культуры.

Плотность загрязнения почвы  $^{137}Cs$  не влияет на  $K_p$  при ее значениях выше 90 кБк/м<sup>2</sup>. Однако для низких плотностей загрязнения выявлено аномальное повышение  $K_p$  (рис. 3, б). В разрезе отдельных культур наиболее выражено повышение  $K_p$  при низких плотностях загрязнения для бобовых (клевер, люцерна) и злаковых культур (озимая и яровая пшеница, озимая рожь, овес, пайза), а также для бобово-злакового разнотравья. В отдельных случаях  $K_p$   $^{137}Cs$  в урожай этих культур повышается на порядок относительно среднего значения при плотности загрязнения ниже 90 кБк/м<sup>2</sup>.

Вероятно, нелинейная связь между плотностью загрязнения почвы радионуклидом и его удельной активностью в растениях обусловлена возрастанием относительного вклада трансфолиарного загрязнения на наименее загрязненных почвах. Интенсивность корневого поступления  $^{137}Cs$  определяется локальным загрязнением, а интенсивность вторичного выпадения радионуклида на надземные части растений обусловлена региональными особенностями загрязнения. Участки для отбора образцов отбирали в наиболее загрязненных районах, где до настоящего времени сохраняются вторичный подъем, атмосферный перенос и переосаждение радиоактивных аэрозолей. В этих условиях на почвах с низким уровнем загрязнения хорошо заметен вклад трансфолиарного поступления.

Значимое влияние на накопление  $^{137}Cs$  растениями оказывает также влагообеспеченность в период активного роста большинства культур (первые две декады июня). Заметное повышение  $K_p$  происходит при влажности верхнего 5-сантиметрового слоя почвы менее 30 % от полной влагоемкости (рис. 3, в). Подобное поведение  $^{137}Cs$  в системе «почва–растение» показано нами в экспериментах ранее [25] и объяснено снижением подвижности  $K^+$  при низком содержании влаги в почве, что приводит к его дефициту в ризосфере [26].

Долю ионообменной формы загрязнителя от его валового содержания в почве нередко рассматривают в качестве показателя биологической доступности. Однако в отношении  $^{137}Cs$  на отдаленном этапе радиоактивных выпадений выявлена обратная логарифмическая связь между долей ионообменной формы радионуклида в почве и  $K_p$ . Для объяснения этого явления необходимо принять следующее. Во-первых, корневое поступление радиоактивных изотопов Cs происходит из почвенного раствора [27]. Во-вторых, в почвах минерального происхождения сорбция  $^{137}Cs$  из почвенного раствора наблюдается преимущественно на расширенных краевых участках межпакетных пространств слоистых глинистых минералов с последующей фиксацией элемента в межпакетных пространствах [8]. В-третьих, в почвах минерального происхождения основная емкость почвенного поглощающего комплекса формируется за счет глинистых минералов. Поэтому величина сорбции  $^{137}Cs$  глинистыми минералами и емкость почвенного поглощающего комплекса связаны положительной связью. Следовательно, доля радиоактивных изотопов Cs в почвенном поглощающем комплексе и их концентрация в почвенном растворе могут иметь отрицательную связь, проявляющуюся в отрицательной связи между долей  $^{137}Cs$  в ионообменной форме и  $K_p$  радионуклида. В почвах с незначительной сорбционной способностью, обусловленной прежде всего низким содержанием слоистых глинистых минералов в механическом составе, доля ионообменной формы  $^{137}Cs$  редко превышает 7 %, при этом  $K_p$  радионуклида заметно увеличивается на фоне влияния других факторов. Следует отметить, что замена доли  $^{137}Cs$  в ионообменной форме на оценку коэффициента распределения радионуклида между твердой фазой почвы и почвенным раствором несколько ухудшает точность модели.

**Заключение.** Построение моделей на решающих деревьях и их интерпретация с помощью SHAP в приложении к наборам данных по накоплению  $^{137}Cs$  различными видами сельскохозяйственных культур и ствольной древесины сосны позволили как подтвердить известные особенности поведения радионуклида в системе «почва–растение», так и предположить наличие на от-

даленном этапе радиоактивных выпадений новых зависимостей интенсивности его накопления растениями от ряда экологических факторов.

Коэффициент перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в неокоренную древесину сосны в условиях ПГРЭЗ имеет нелинейную связь с высотой участка над уровнем моря (минимальные значения – 130–140 м). На основании анализа связи коэффициента перехода с наиболее значимыми вегетационными индексами установлена его зависимость от общего санитарного состояния насаждения и биологической продуктивности деревьев, их обеспеченности калием и водой. Разреженность древесного полога, вероятно, ассоциирована со снижением конкуренции за элементы питания и воду, что снижает интенсивность накопления радионуклида. При этом в насаждениях с хорошо развитой кроной деревьев (что обуславливает их высокую биологическую продуктивность) и не испытывающих дефицит влаги коэффициент перехода также ниже, чем в среднем для породы.

В отношении сельскохозяйственных культур подтверждено преобладающее влияние вида растения на коэффициент перехода  $^{137}\text{Cs}$ . Также показано, что низкие концентрации  $\text{K}^+$  в почвенном растворе (менее 1 ммоль/л) приводят к усилению накопления радионуклида, и влияние этого фактора более сильное, чем содержание подвижной формы калия в почве. Показано повышение накопления  $^{137}\text{Cs}$  в урожае при недостатке почвенной влаги на фоне влияния других факторов. Резкое усиление соотношения между удельной активностью радионуклида в урожае и плотностью загрязнения почвы при низких уровнях загрязнения объясняется сохранением трансфолитарного загрязнения. Участие слоистых глинистых минералов в формировании как почвенного катионообменного комплекса, так и специфической сорбции Cs обуславливает обратную связь между коэффициентом перехода радиоактивного изотопа данного элемента в растения на почвах с долей его ионообменной формы ниже 7 %.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках мероприятий Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2011–2015 годы и на период до 2020 года, а также Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС.

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the tasks of the State Program for Overcoming the Consequences of the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident for 2011–2015 and for the period until 2020, as well as the Joint Program of Russia and Belarus within the framework of the Union State on the Protection of the Population and the Rehabilitation of the Territories Affected by the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident.

### Список использованных источников

1. Debeljak, M. Decision trees in ecological modelling / M. Debeljak, S. Džeroski // Modelling complex ecological dynamics: An introduction into ecological modelling for students, teachers & scientists / ed.: F. Jopp [et al.]. – Heidelberg, 2011. – P. 197–209.
2. Zhang, B. Modelling the productivity of naturalised pasture in the North Island, New Zealand: a decision tree approach / B. Zhang, I. Valentine, P. Kemp // Ecol. Modelling. – 2005. – Vol. 186, N 3. – P. 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.12.016>
3. Prediction of phytoplankton biomass and identification of key influencing factors using interpretable machine learning models / Y. Xu [et al.] // Ecol. Indicators. – 2024. – Vol. 158. – Art. 111320. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111320>
4. Prediction and analysis of net ecosystem carbon exchange based on gradient boosting regression and random forest / J. Cai [et al.] // Appl. Energy. – 2020. – Vol. 262. – Art. 114566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114566>
5. Predictive models for the effect of environmental factors on the abundance of vibrio parahaemolyticus in oyster farms in taiwan using extreme gradient boosting / N. Ndraha [et al.] // Food Control. – 2021. – Vol. 130. – Art. 108353. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108353>
6. Golden, C. E. Comparison between random forest and gradient boosting machine methods for predicting *Listeria* spp. prevalence in the environment of pastured poultry farms / C. E. Golden, M. J. Rothrock, A. Mishra // Food Res. Int. – 2019. – Vol. 122. – P. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.062>
7. Techniques to improve ecological interpretability of black-box machine learning models / T. Welchowski [et al.] // J. Ag., Biol. Envir. St. – 2021. – Vol. 27, N 1. – P. 175–197. <https://doi.org/10.1007/s13253-021-00479-7>
8. Konoplev, A. Mobility and bioavailability of the Chernobyl-derived radionuclides in soil-water environment: Review / A. Konoplev // Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl / ed. by A. Konoplev, K. Kato, S. N. Kalmykov. – Singapore, 2020. – P. 157–193. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_3)
9. Мирошников, В. Справочник таксатора / В. Мирошников, О. Труль, В. Ермаков. – Минск: Ураджай, 1980. – 359 с.
10. Радиационный контроль. Обследование лесосек. Порядок проведения: ТКП 239.2010 (02080). Введ. 01.06.2010 / М-во лесн. хоз-ва Респ. Беларусь. – Минск: М-во лесн. хоз-ва Респ. Беларусь, 2010. – 22 с.
11. Практикум по агрохимии: учеб. пособие / О. А. Амелянчик [и др.]; под ред. В. Минеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 689 с.
12. Gilmore, G. R. Practical gamma-ray spectrometry / G. R. Gilmore. – 2nd ed. – John Wiley & Sons, 2008. – 387 p.
13. Tarsitano, D. Evaluating and reducing a model of radiocaesium soil-plant uptake / D. Tarsitano, S. Young, N. Crout // J. Environ. Radioactiv. – 2011. – Vol. 102, N 3. – P. 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.11.017>

14. Deriving probabilistic soil distribution coefficients (Kd). Part 2: Reducing caesium Kd uncertainty by accounting for experimental approach and soil properties / Ramírez-Guinart O. [et al.] // *J. Environ. Radioactiv.* – 2020. – Vol. 223–224. – Art. 106407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106407>
15. Sheppard, S. C. Robust prediction of Kd from soil properties for environmental assessment / S. C. Sheppard // *Hum. Ecol. Risk Assess.* – 2011. – Vol. 17, N 1. – P. 263–279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106407>
16. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services / M. Drusch [et al.] // *Remote Sensing Environ.* – 2012. – Vol. 120. – P. 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
17. ALOS World 3D 30-meter DEM. V3.2 [Electronic resource] / JAEA 2021. – Mode of access: <https://doi.org/10.5069/G94M92HB>. – Date of access: 17.11.2021.
18. Version 4 of the SMAP level-4 soil moisture algorithm and data product / R. H. Reichle [et al.] // *J. Adv. Model. Earth Syst.* – 2019. – Vol. 11, N 10. – P. 3106–3130. <https://doi.org/10.1029/2019MS001729>
19. Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree [Electronic resource] / G. Ke [et al.] // *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)* / ed. by I. Guyon [et al.]. – Mode of access: [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf). – Date of access: 31.05.2024.
20. Snoek, J. Practical bayesian optimization of machine learning algorithms [Electronic resource] / J. Snoek, H. Larochelle, R. P. Adams // *Proceedings of the 25th International conference on neural information processing systems: in 2 vol.* – Lake Tahoe, Nevada: Curran Associates Inc., 2012. – Vol. 2. – P. 2951–2959. Mode of access: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2999325.2999464>. – Date of access: 31.05.2024.
21. Explainable machine-learning predictions for the prevention of hypoxaemia during surgery / S. M. Lundberg [et al.] // *Nat. Biomed. Engin.* – 2018. – Vol. 2, N 10. – P. 749–760. <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0304-0>
22. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees / S. M. Lundberg [et al.] // *Nat. Machine Intel.* – 2020. – Vol. 2, N 1. – P. 56–67. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0138-9>
23. Анализ возможности использования спутниковых данных для прогноза параметров перехода радиоактивных изотопов цезия из почвы в древесные растения / А. Н. Никитин А. [и др.] // Восьмой белорусский космический конгресс: материалы, 25–27 окт. 2022 г., г. Минск: в 2 т. / науч. ред.: С. В. Кругликов, И. В. Филиппенко. – Минск, 2022. – Т. 1. – С. 245–249.
24. The high affinity K<sup>+</sup> transporter AtHAK5 plays a physiological role in planta at very low K<sup>+</sup> concentrations and provides a caesium uptake pathway in arabidopsis / Z. Qi [et al.] // *J. Exp. Bot.* – 2008. – Vol. 59, N 3. – P. 595–607. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm330>
25. Экспериментальная оценка влияния режима увлажнения почвы на накопление <sup>137</sup>Cs побегами яровой пшеницы / А. Н. Никитин [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук.* – 2020. – Т. 65, № 2. – P. 229–238.
26. Nikitin, A. N. Impact of soil moisture on cesium uptake by plants: Model assessment / A. N. Nikitin // *J. Environ. Radioactiv.* – 2021. – Vol. 240. – Art. 106754. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106754>
27. Smolders, E. Concentrations of <sup>137</sup>Cs and K in soil solution predict the plant availability of <sup>137</sup>Cs in soils / E. Smolders, K. Van den Brande, R. Merckx // *Environ. Sci. Technol.* – 1997. – Vol. 31, N 12. – P. 3432–3438. <https://doi.org/10.1021/es970113r>

## References

1. Debeljak M., Džeroski S. Decision trees in ecological modelling. *Modelling complex ecological dynamics: An introduction into ecological modelling for students, teachers & scientists*. Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 197–209. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-05029-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-05029-9_14)
2. Zhang B., Valentine L., Kemp P. Modelling the productivity of naturalised pasture in the North Island, New Zealand: a decision tree approach. *Ecological Modelling*, 2005, vol. 186, no. 3, pp. 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.12.016>
3. Xu Y., Zhang D., Lin J., Peng Q., Lei X., Jin T., Wang J., Yuan R. Prediction of phytoplankton biomass and identification of key influencing factors using interpretable machine learning models. *Ecological Indicators*, 2024, vol. 158, art. 111320. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111320>
4. Cai J., Xu K., Zhu Y., Hu F., Li L. Prediction and analysis of net ecosystem carbon exchange based on gradient boosting regression and random forest. *Applied Energy*, 2020, vol. 262, art. 114566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114566>
5. Ndraha N., Hsiao H., Hsieh Y., Pradhan A. K. Predictive models for the effect of environmental factors on the abundance of vibrio parahaemolyticus in oyster farms in taiwan using extreme gradient boosting. *Food Control*, 2021, vol. 130, art. 108353. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108353>
6. Golden C. E., Rothrock M. J., Mishra A. Comparison between random forest and gradient boosting machine methods for predicting Listeria spp. prevalence in the environment of pastured poultry farms. *Food Research International*, 2019, vol. 122, pp. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.062>
7. Welchowski T., Maloney K. O., Mitchell R., Schmidt M. Techniques to improve ecological interpretability of black-box machine learning models. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 175–197. <https://doi.org/10.1007/s13253-021-00479-7>
8. Konoplev A. Mobility and bioavailability of the Chernobyl-derived radionuclides in soil-water environment: Review. *Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl*. Singapore, 2020, pp. 157–193. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_3)
9. Miroshnikov V., Trul' O., Ermakov V. *Taxator's handbook*. Minsk, Uradzhai Publ., 1980. 359 p. (in Russian).
10. *Radiation control. Inspection of cutting areas. Procedures*, 239.2010 (02080). 01.06.2010. Minsk, Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, 2010. 22 p. (in Russian).
11. Amel'yanchik O. A., Bolysheva T. N., Gomonova N. F., Durygina E. P., Egorov V. S., Egorova E. V. [et al.]. *Workshop on agrochemistry. 2nd ed.* Moscow, Moscow State University Publ., 2001. 689 p. (in Russian).
12. Gilmore G. R. *Practical gamma-ray spectrometry. 2nd ed.* John Wiley & Sons, 2008. 387 p.
13. Tarsitano D., Young S., Crout N. Evaluating and reducing a model of radiocaesium soil-plant uptake. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2011, vol. 102, no. 3, pp. 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.11.017>
14. Ramírez-Guinart O., Kaplan D., Rigol A., Vidal M. Deriving probabilistic soil distribution coefficients (Kd). Part 2: Reducing caesium Kd uncertainty by accounting for experimental approach and soil properties. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 223–224, art. 106407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106407>

15. Sheppard S. C. Robust prediction of Kd from soil properties for environmental assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 263–279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106407>
16. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F. [et al.]. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 120, pp. 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
17. ALOS World 3D 30-meter DEM. V3.2. *JAEA* 2021. Available at: <https://doi.org/10.5069/G94M92HB> (accessed 17.11.2021).
18. Reichle R. H., Liu Q., Koster R. D., Crow W. T., De Lannoy G. J. M., Kimball J. S. [et al.]. Version 4 of the SMAP level-4 soil moisture algorithm and data product. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, vol. 11, no. 10, pp. 3106–3130. <https://doi.org/10.1029/2019MS001729>
19. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*. Available at: [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf) (accessed 31.05.2024).
20. Snoek J., Larochelle H., Adams R. P. Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms. *Proceedings of the 25th International conference on neural information processing systems*: in 2 vol. Lake Tahoe, Nevada, Curran Associates Inc., 2012, pp. 2951–2959. Available at: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/2999325.2999464> (accessed 31.05.2024).
21. Lundberg S. M., Nair B., Vavilala M. S., Horibe M., Eisses M. J., Adams T., Liston D. E., Low D. K., Newman S., Kim J., Lee S. Explainable machine-learning predictions for the prevention of hypoxaemia during surgery. *Nature Biomedical Engineering*, 2018, vol. 2, no. 10, pp. 749–760. <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0304-0>
22. Lundberg S. M., Erion G., Chen H., DeGrave A., Prutkin J. M., Nair B., Katz R., Himmelfarb J., Bansal N., Lee S. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature Machine Intelligence*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 56–67. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0138-9>
23. Nikitin A. N., Kudin M. V., Cheshik I. A., Shurankova O. A., Mishchenko E. V., Sukhareva D. V., Zhukovskaya E. V., Bli-nova N. V. Analysis of the possibility of using satellite data to predict the parameters of the transfer of radioactive cesium isotopes from soil to trees. *Vos'moi Belorusskii kosmicheskii kongress: materialy kongressa, 25–27 oktyabrya 2022 goda, Minsk. Tom 1* [Eighth Belarusian Space Congress: materials of the congress, October 25–27, 2022, Minsk. Volume 1]. Minsk, 2022, pp. 245–249 (in Russian).
24. Qi Z., Hampton C. R., Shin R., Barkla B. J., White P. J. The high affinity K<sup>+</sup> transporter AtHAK5 plays a physiological role in planta at very low K<sup>+</sup> concentrations and provides a caesium uptake pathway in arabidopsis. *Journal of Experimental Botany*, 2008, vol. 59, no. 3, pp. 595–607. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm330>
25. Nikitin A. N., Shurankova O. A., Cheshik I. A., Leferd G. A., Mishchenko E. V., Zhukovskaya E. V., Sukhareva D. V. Experimental assessment of influence of soil moisture on the <sup>137</sup>Cs accumulation in shoots of spring wheat. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2020, vol. 65, no. 2, pp. 229–238 (in Russian).
26. Nikitin A. N. Impact of soil moisture on cesium uptake by plants: Model assessment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, vol. 240, art. 106754. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106754>
27. Smolders E., den Brande K. V., Merckx R. Concentrations of <sup>137</sup>Cs and K in soil solution predict the plant availability of <sup>137</sup>Cs in soils. *Environmental Science & Technology*, 1997, vol. 31, no. 12, pp. 3432–3438. <https://doi.org/10.1021/es970113r>

## Інфармацыя аб аўтарах

*Нікіцін Аляксандр Ніколаевіч* – канд. с/х навук, за-меститель дырэктара. Інстытут мікробіялогіі НАН Беларусі (ул. Купрэвіча, 2, 220141, г. Мінск, Рэспубліка Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-1369-0093>. E-mail: [nikitinale@gmail.com](mailto:nikitinale@gmail.com)

*Кудін Максім Вадзіміравіч* – канд. с/х навук, доцент, заместитель дырэктара. Полескіі гасударствены радыяцыйна-экалагічны запаведнік (ул. Тэрэшковай, 7, 247618, г. Хойнікі, Рэспубліка Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-6857-2337>. E-mail: [max.kudin@mail.ru](mailto:max.kudin@mail.ru)

*Калінічэнка Сяргей Аляксандравіч* – канд. біол. навук, доцент, заведучы лабараторыі. Полескіі гасударствены радыяцыйна-экалагічны запаведнік (ул. Тэрэшковай, 7, 247618, г. Хойнікі, Рэспубліка Беларусь). E-mail: [s-a-k@list.ru](mailto:s-a-k@list.ru)

*Ласко Тамара Васільевна* – ст. науч. супрацоўнік. Інстытут радыябіялогіі НАН Беларусі (ул. Федюнінскага, 4, 246007, г. Гомель, Рэспубліка Беларусь). E-mail: [t-lasko@yandex.by](mailto:t-lasko@yandex.by)

*Шуранкова Ольга Аляксандраўна* – науч. супрацоўнік. Інстытут радыябіялогіі НАН Беларусі (ул. Федюнінскага, 4, 246007, г. Гомель, Рэспубліка Беларусь). E-mail: [shurankova@list.ru](mailto:shurankova@list.ru)

*Мищенко Егор Викторович* – заместитель заведучага лабараторыі. Інстытут радыябіялогіі НАН Беларусі (ул. Федюнінскага, 4, 246007, г. Гомель, Рэспубліка Беларусь). E-mail: [egormischenko@gmail.com](mailto:egormischenko@gmail.com)

## Information about the authors

*Aleksander N. Nikitin* – Ph. D. (Agricult.), Deputy Director. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-1369-0093>. E-mail: [nikitinale@gmail.com](mailto:nikitinale@gmail.com)

*Maksim V. Kudin* – Ph. D. (Agricult.), Associate Professor, Deputy Director. Polesie State Radioecological Reserve (7, Tereshkova Str., 247618, Choiniki, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-6857-2337>. E-mail: [max.kudin@mail.ru](mailto:max.kudin@mail.ru)

*Sergey A. Kalinichenko* – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of the Laboratory. Polesie State Radioecological Reserve (7, Tereshkova Str., 247618, Choiniki, Republic of Belarus). E-mail: [s-a-k@list.ru](mailto:s-a-k@list.ru)

*Tamara V. Lasko* – Senior Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [t-lasko@yandex.by](mailto:t-lasko@yandex.by)

*Olga A. Shurankova* – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [shurankova@list.ru](mailto:shurankova@list.ru)

*Egor V. Mishchanka* – Deputy head of the Laboratory. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [egormischenko@gmail.com](mailto:egormischenko@gmail.com)