

15. Карты-схемы. Т. XLV. Гидрология СССР. Калининградская область испарение из поверхности почвы [Электронный ресурс]. URL: <https://hge.spbu.ru/mapgis/subekt/kalinin/kalinin.html>.

## REFERENCES

1. Puntusov V.G. Ocenka meliorativnogo sostoyaniya osushaemykh sel'skohozyajstvennykh zemel' Kaliningradskoj oblasti po vodnomu rezhimu // Kompleksnoe ispol'zovanie i ohrana vodnykh resursov regiona: sb. nauch. tr. Kaliningrad: Izd-vo KGTU, 2011. P. 129–134.
2. Spirin YU.A., Puntusov V.G. Issledovanie meliorativnogo sostoyaniya osushaemykh sel'skohozyajstvennykh zemel' na pol'dere nasosnoj stancii № 20a v Slavskom rajone Kaliningradskoj oblasti // Opyt proshlogo – vzglyad v budushchee: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchyonnykh i studentov. Tula: Izd-vo TGU, 2016. P. 129–133.
3. Sergeev A. I. Sovremennyye metody ocenki ehffektivnosti raboty nasosnykh stanciy v sisteme vodootvedeniya // Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2008. № 5. S. 72–73.
4. Lyahomskij A.V., Petrochenkov A.B., Perfil'eva E.N. Konceptual'noe proektirovanie i napravleniya inzhiniringa povysheniya ehnergoehffektivnosti predpriyatij // Elektrotehnika. 2015. № 6. P. 4–7.
5. Pauli V.K., Tul'chinskaya YA.I. Postroenie otraslevoj sistemy ehnergeticheskogo menedzhmenta – odno iz napravlenij povysheniya nadyozhnosti i ehnergoehffektivnosti ehlektroehnergetiki Rossii // Vestnik Moskv. ehnergt. in-ta. 2012. № 5. P. 36–41.
6. Miguel A. Moreno, Pedro A. Carrión, Patricio Planells et al. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations // Biosystems Engineering, 2007. P. 479–486.
7. Naumov V.A. Metody obrabotki gidrologicheskoy informacii: laboratornyj praktikum dlya studentov vuzov,

obuchayushchihsya v bakalavriate po napravleniyu podgotovki «Prirodoobustrojstvo i vodopol'zovanie». Kaliningrad: Izd-vo FGBOU VPO «KGTU», 2014. P. 67–72.

8. EHlektronnyj uchebnyk po statistike [EHlektronnyj resurs] URL: <http://statsoft.ru/> (data obrashcheniya: 15.04.19).
9. Kiselev P.G. Gidravlika. Osnovy mekhaniki zhidkosti: ucheb. posobie dlya vuzov. M.: ENnergiya, 1980. 360 pp.
10. Spravochnik po gidravlicheskim raschyotam / P.G. Kiselyov, A.D. Al'tshul', N.V. Danil'chenko i dr. Izd. 4-e., pererabot. i dop. M.: Energiya, 1972.
11. Puntusov V.G., Spirin YU.A. K voprosu o povyshenii ehnergoehffektivnosti nasosnogo oborudovaniya na osushaemykh sel'skohozyajstvennykh zemlyah, pol'dera nasosnoj stancii № 20a. v Slavskom rajone Kaliningradskoj oblasti // Aehkonomika: ehkonomika i sel'skoe hozyajstvo. 2018. № 4 (28). P. 27–33.
12. Rossijskij proizvoditel' nasosov i komplektuyushchih [EHlektronnyj resurs]. URL: <http://t-sila.ru> (data obrashcheniya: 15.03.19).
13. Oficial'nyj sayt proizvoditelya nasosov «Flygt» [EHlektronnyj resurs]. URL: <https://www.xytem.com> (data obrashcheniya: 15.03.19).
14. Ekspluatatsiya pol'demnykh system. M: Kolos, 1981. 176 p.
15. Karty-skhemy T. XLV. Gidrologiya SSSR. Kaliningradskaya oblast' isparenje iz poverhnosti pochvy.

Спирин Юрий Александрович, аспирант, кафедра геоэкологии, e-mail: [spirin1234567890@rambler.ru](mailto:spirin1234567890@rambler.ru) (ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»); Пунтусов Владимир Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра водных ресурсов и водопользования, зам. директора, e-mail: [v.puntusov57@mail.ru](mailto:v.puntusov57@mail.ru) (ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»), ФГБУ «Управление «Калининградмелиоводхоз»».

УДК 696.133.33

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАЦИИ ВНУТРИСУТОЧНОГО СТОКА ПАВОДКА



С.В. ВАСИЛЕНКОВ, Ю.А. МАЖАЙСКИЙ, В.Н. КРОВОПУСКОВА

**Ключевые слова:** пруд, расчет трансформации паводочного стока, гидрограф паводка, водосброс.

**Keywords:** pond, routing peak flow, flood hydrograph, spillway.

Цель исследования — разработка методики расчета графиков притока к водосборным сооружениям плотин, рассмотрение закономерностей трансформации паводочного стока в результате превышения притока над сбросом воды в пруд. Учитывая этот процесс при проектировании прудов, можно уменьшить максимальный расход и, соответственно, уменьшить размеры водосборных сооружений и их стоимость. Объектом исследования являются пруды с малыми водосборными площадями, которым присущи внутрисуточные колебания расходов воды, обусловленные внутрисуточными колебаниями температуры воздуха и разными темпами таяния снега в течение суток. Большинство прудов Брянской области построено на балках, оврагах, ручьях, очень малых

реках с малыми водосборными площадями, для которых особенно актуально совершенствование методов расчета трансформации внутрисуточного стока и прогнозирование формы гидрографов, поиски наименее трудоемких и наиболее приемлемых способов расчета. Предложена математическая модель, позволяющая оптимизировать расчеты.

The purpose of the study is to develop a method for calculating flow schedules in the dams' spillway structures, to consider the regularities of the flood flow transformation as a result of exceeding the inflow over the discharge of water into the pond. Given this process in the design of ponds, it is possible to reduce the maximum consumption and, accordingly, reduce the size of the spillway structures and their cost. The object of the study are ponds with small catchment areas, which are characterized by intra-day fluctuations in water flow due to intra-day fluctuations in air temperature and different rates of snow melting during the day. Most of the ponds in the Bryansk region are built on gullies, ravines, streams, very small rivers with small catchment areas, for which it is especially important to improve the methods of calculating the transformation of intraday flood flow and forecasting the shape of hydrographs, the search for the least time-consuming and the most acceptable methods of calculation. The proposed mathematical model allows to optimize the calculations.

**В**ведение. Одной из основных задач рационального проектирования водоспускных сооружений является определение оптимального, экономически выгодного соотношения между размерами водосбросных сооружений и высотой плотины. Решение этой задачи, в свою очередь, сводится к определению регулирующего влияния водоема [1].

Регулирующее действие водоема при прохождении паводка заключается в следующем. В течение некоторого времени от начала паводка часть притекающей воды задерживается в водоеме, поскольку в это время из водоема вытекает воды меньше, чем поступает в него. По мере наполнения сливной призмы водоема возрастает напор на водосбросном сооружении, вследствие чего увеличивается и расход воды, вытекающий из водоема. На спаде паводка приток воды к водоему убывает. В конце концов приток становится меньше сброса, после чего начинает сбрасываться и запас воды, накопленный в водоеме в предыдущий период (сливная призма), вследствие чего истечение из водоема продолжается еще некоторое время после прохождения паводка, когда приток воды к водоему уже прекратился.

Таким образом, при прохождении волны паводка через водоем происходит некоторое перераспределение стока во времени. Гидрограф паводка несколько растягивается и становится более пологим, причем общая продолжительность паводка увеличивается, а максимальные расходы уменьшаются. Общий же объем стока паводка, если не считать некоторых потерь в водоеме, остается при этом неизменным.

Непрерывное, плавное перераспределение стока, конечно, будет иметь место лишь при свободном истечении из водоема, когда водоспускное сооружение представляет собой неподтопленное отверстие, не перекрытое затворами. К такому типу в большинстве случаев и относятся паводочные водоспуски прудов и плотин [2, 3].

**Методика исследований.** Экспедиционные обследования проводили в Брянской области на существующих прудах с длительным сроком службы. По данным инвентаризации, на территории Брянской области имеется 795 гидротехнических сооружений (гидроузлы с водохранилищами и прудами). Преобладающим типом водосбросного сооружения является шахтный водосброс. Высота плотины — преимущественно 5...7 м. Из них к опасным объектам отнесено только 67 гидротехнических сооружений со значительным сроком службы. Принимаются меры по безопасности этих сооружений.

В период полевых исследований измеряли следующие характеристики: уровни воды в пруду и слой воды на кромке водослива в течение суток, температуру воздуха, температуру воды в водоеме, высоту плотины и превышение гребня плотины над отметкой водосливной кромки шахтных водосбросов. Проводился отбор проб воды, а также учитывали климатические условия местности, ледовый режим водоема в период паводка.

В практике проектирования прудов слой регулирующей емкости обычно принимается 0,5...1,5 м. Основным критерием назначения толщины этого слоя является предельно допустимая площадь затопления сельхозугодий и жилой территории. Если ограничи-

вать высоту регулирующей призмы величиной 0,5 м, то можно сэкономить на насыпи плотины.

Однако стоимость водосброса является наиболее дорогой частью гидроузла. Экономия на плотине уменьшает объем призмы аккумуляции и увеличивает сбросной расход. Соответственно увеличивается стоимость сбросного сооружения [4]. По расчетам проектных организаций экономия на плотине в 1,5...2 раза перекрывается удорожанием сбросных сооружений [5].

Как показали обследования, вопросу регулирования стока воды призмой аккумуляции при проектировании прудов уделялось недостаточное внимание. При уменьшении регулирующей емкости прудов резко повысится стоимость водопропускных сооружений. Особенно это проявляется на прудах с малой площадью зеркала воды (до 5 га) [5]. Таких прудов в Брянской области насчитывается 509.

**Результаты исследований.** Сброс воды из пруда в период паводка является ответственным мероприятием, и выбор оптимального режима работы водосброса можно успешно осуществить только на основании математической модели, характеризующей изменения уровней воды на кромке водосбросного сооружения во времени. Для построения модели используем схему образования призмы трансформации паводка (рис. 1).

В пруд входит поток с удельным расходом  $q_1$ . Из пруда выходит поток с удельным расходом  $q_2$ . Разница расходов формирует объем накопления или истощения призмы трансформации за время  $dt$ :

$$\varphi! \frac{dZ}{dt} = q_1 - q_2,$$

где  $Z = Z_1 - Z_2$  — перепад уровней воды в истоке пруда и шахты, отсчитываемый от горизонтальной оси 0—0 (линии, к которой бесконечно приближаются кривые свободной поверхности воды в разные моменты времени);  $l$  — расстояние от выходного сечения 2—2 до гипотетической точки пересечения кривых свободной поверхности воды;

На схеме форма кривых свободной поверхности воды приближается к S-образным кривым. Во время подъема уровня воды в пруду ледяное поле поднимает-

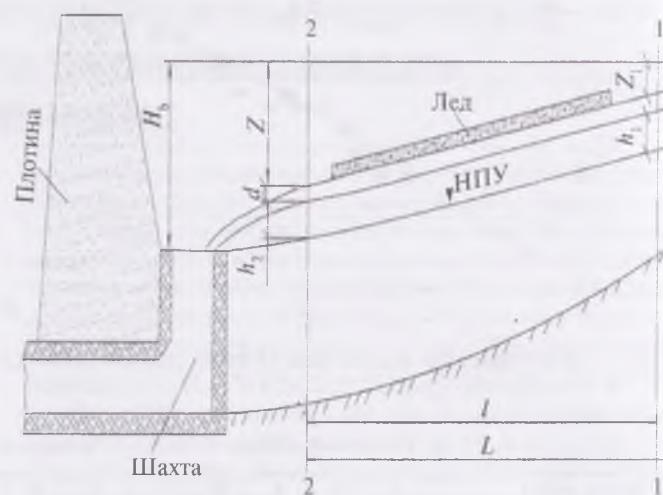


Рис. 1. Схема сработки призмы трансформации паводка

ся, образуя свободные от воды пространства возле водосбросного сооружения и верховьях пруда.

Скорость движения воды в пруду незначительна. Пруд находится во время паводка подо льдом, турбулизации воды ветром не происходит, вода не прогревается, значит, высока ее вязкость. Все это позволяет предположить, что движение воды является ламинарным, и скорость потока воды пропорциональна уклону в первой степени:

$$\varphi l \frac{dZ}{dt} = k_1 h_1 \frac{Z_1}{L-l} - k_2 h_2 \frac{Z}{L}.$$

Перепад напора во входном сечении 1–1 находим так же, как  $dZ$ , из пропорции, считая, что поверхность воды на продольном профиле пруда – прямая линия:

$$\frac{Z_1}{Z} = \frac{L-l}{L}.$$

Так как уклон уровня воды принят постоянным, можно записать:

$$\varphi l \frac{dZ}{dt} = k_1 h_1 \frac{Z}{L} - k_2 h_2 \frac{Z}{L}.$$

Осаждаясь в створе выклинивания подпора, наносы повышают отметку дна русла и кривой свободной поверхности воды. Слой заиления и кривая подпора постепенно распространяются вверх по течению

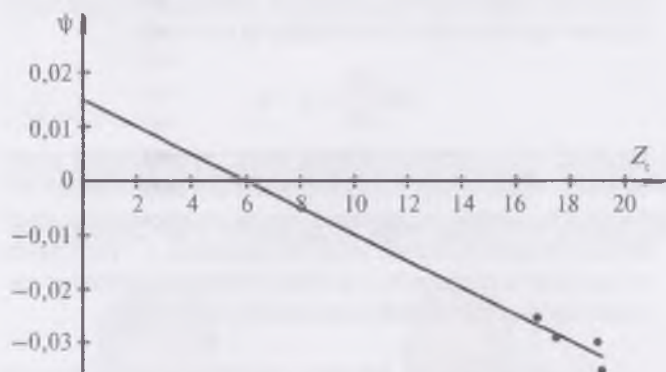


Рис. 2. График линейной зависимости  $\psi$  от  $Z_1$

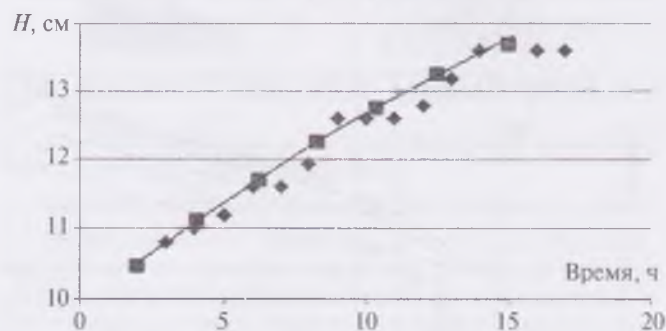


Рис. 3. Изменение слоя воды на шахте в период подъема паводка:  
 ◆ – экспериментальные точки; ■ – расчетные данные

Расчетные данные по пруду с. Кокино за 10.04.2011

Время, ч	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
H, см	10,6	10,5	10,8	11,0	11,2	11,5	11,5	12,0	12,5	12,5	12,5	12,7	12,2	13,5	13,7

от первоначального входного створа 1–1, но начальная глубина воды  $h_n$  остается постоянной, то есть  $h_1 = h_n = \text{const}$ .

В уравнение баланса введем обобщенные параметры,  $1/(\text{сут} \cdot \text{м})$ :

$$N = \frac{h_n k_1}{\varphi l L}; \quad \mu_1 = \frac{k_2}{\varphi l L}.$$

Тогда

$$\frac{dZ}{dt} = NZ - \mu_1 h_2 Z. \tag{1}$$

Поскольку  $h_2 = H_b - Z$ , уравнение (1) примет вид:

$$\frac{dZ}{dt} = NZ - \mu_1 (H_b - Z)Z. \tag{2}$$

Интегрируя уравнение (2) при начальных значениях  $t_n = 0, Z_n = Z_0$ , получим аналитическое выражение для S-образных кривых изменения слоя трансформации паводка во времени:

$$Z = \frac{Z_{\text{ст}}}{1 + \frac{Z_{\text{ст}} - Z_0}{Z_0} e^{a t}}.$$

где  $Z_{\text{ст}}$  – стационарный перепад напора в рассматриваемом створе при равенстве расходов притока и сброса воды, м;  $Z_0$  – параметр, характеризующий перепад напора в начальный момент времени на пике паводка, м;  $a$  – комплексный параметр, характеризующий максимальную удельную скорость изменения уровней,  $1/\text{сут}$ .

Для того, чтобы предсказать изменение уровней воды по кинетической модели в любой момент времени нужно знать описанные выше параметры:  $Z_{\text{ст}}, Z_0, a$ .

Для нахождения этих параметров необходимо экспериментально полученные значения изменения уровней воды за некоторый интервал времени на не-

сти на график с ординатой  $\Psi = \frac{Z_{t+\Delta t} - Z_t}{Z_{t+\Delta t}}$  и абсциссой  $Z_t$ . Для нахождения  $Z_0$ , а значит и положения оси отсчета  $0-0$  нужно, задаться сначала минимальным значением  $Z_0$ , а затем, постепенно увеличивая его методом последовательных приближений, добиться на графике линейной зависимости  $\psi$  от  $Z_t$  (рис. 2).

Полученную на графике прямую линию продолжают до пересечения с осями абсцисс и ординат. На оси ординат получается отрезок, численно равный  $\Psi_m = 1 - e^{-a \Delta t}$ , а на оси абсцисс отрезок  $Z_{\text{ст}}$ . Зная времен-

ной интервал  $\Delta t$ , находим  $a = \frac{\ln(1 - \Psi_m)}{\Delta t}$ .

Кафедрой природообустройства и водопользования получены данные по изменению за 15 ч уровней воды на кромке водослива пруда с. Кокино Выгоничского района Брянской области (таблица).

По данным таблицы строим график изменению уровней воды (рис. 3), находим параметры модели, используя методику, описанную выше:  $Z_{\text{ст}} = 8,3$  см;  $Z_0 = 4,1$  см;  $a = -0,144$   $1/\text{ч}$ .

Для сравнения на график с экспериментальными данными наносим расчетные (рис. 3). Согласованность результатов расчета и эксперимента обосновывает возможность применения полученной кинетической модели для прогнозов изменения уровней воды на кромке водосливного сооружения.

#### Выводы

1. Усовершенствованием конструкции оголовка шахтного водосбросного сооружения, способного регулировать накопление слоя трансформации паводка, можно создавать максимальный объем воды в нем для снижения сбросного расхода, корректируя режим работы водосброса в каждый день паводка.

2. Согласованность результатов расчетов и эксперимента обосновывает возможность применения полученной кинетической модели для прогнозов изменения уровней воды на кромке водослива.

3. S-образные кривые зависимости расхода воды от времени в периоды подъема—спада паводка более точно аппроксимируются прямыми линиями (по сравнению с показательными кривыми), что свидетельствует в пользу метода Д.И. Кочерина.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Железняк И.А. Регулирование паводочного стока: монография. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
2. Мелиоративная история Брянщины. Люди и дела / В.Ф. Василенков, С.В. Василенков, Е.В. Байдакова [и др.] Брянск, 2018.
3. Рекомендации по строительству малых прудов в колхозах и совхозах Чувашский АССР / В.Ф. Василенков, К.П. Петров, Ю.И. Родионов. Чебоксары: Чувашкнигоиздат, 1973. 36 с.
4. Василенков В.Ф., Кривоускова В.Н. Методика расчета оптимальных параметров шахтного водосброса // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 3. С. 35–42.
5. Перехрест С.М. Об основных вопросах проектирования колхозных прудов // Гидротехника и мелиорация. 1950. № 3. С. 29–35.

6. Водоприемный оголовок шахтного водосброса: патент № 119356 / В.Н. Кривоускова, В.Ф. Василенков, С.В. Василенков, О.Н. Демина // Заявл. № 2012108994 от 11 марта 2012 г. Опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.

7. Водоприемный оголовок шахтного водосброса / В.Ф. Василенков, С.В. Василенков, В.Н. Кривоускова, О.Н. Демина // Проблемы энергообеспечения информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК: материалы международной научно-технической конференции 12–14 сентября. Брянск: Изд-во БГСХА, 2012. С. 36–38.

#### REFERENCES

1. Zheleznyak I.A. Regulirovanie povodochnogo stoka: monografiya. L.: Gidrometeoizdat, 1965. 328 s.
2. Meliorativnaya istoriya Bryanshhiny'. Lyudi i dela / V.F. Vasilenkov, S.V. Vasilenkov, E.V. Bajdakova [i dr.] Bryansk, 2018.
3. Rekomendacii po stroitel'stvu mal'x prudov v kolkozax i sovhozax Chuvashskij ASSR / V.F. Vasilenkov, K.P. Petrov, Yu.I. Rodionov. Cheboksary': Chuvashknigoizdat, 1973. 36 s.
4. Vasilenkov V.F., Krovopuskova V.N. Metodika rascheta optimal'ny'x parametrov shaxtnogo vodospbrosa // Vestnik Bryanskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2016. № 3. S. 35–42.
5. Perexrest S.M. Ob osnovny'x voprosax proektirovaniya kolkozny'x prudov // Gidrotexnika i melioraciya. 1950. № 3. S. 29–35.
6. Vodopriemny'j ogolovok shaxtnogo vodospbrosa: patent № 119356 / V.N. Krovopuskova, V.F. Vasilenkov, S.V. Vasilenkov, O.N. Demina // Zayavl. № 2012108994 ot 11 marta 2012 g. Opubl. 20.08.2012, Byul. № 23.
7. Vodopriemny'j ogolovok shaxtnogo vodospbrosa / V.F. Vasilenkov, S.V. Vasilenkov, V.N. Krovopuskova, O.N. Dyomina // Problemy` e`nergoobespecheniya informatizacii i avtomatizacii, bezopasnosti i prirodopol'zovaniya v APK: materialy` mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii 12–14 sentyabrya. Bryansk: Izd-vo BGSXA, 2012. S. 36–38.

Василенков Сергей Валерьевич, доктор техн. наук, доцент кафедры природообустройства и водопользования; Кривоускова Валентина Николаевна, ст. преподаватель кафедры природообустройства и водопользования, e-mail: poivr@bgsha.com (ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»); Мажайский Юрий Анатольевич, доктор с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, e-mail: mail@mntc.pro (Мещерский филиал ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова»).

УДК 631.611:631.95

## ТРАНСФОРМАЦИЯ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ВЫВЕДЕННЫХ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБОРОТА ЗЕМЕЛЬ С РАДИОАКТИВНЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ



О.А. МЕРЗЛОВА

(Продолжение. Начало в № 6, 2019)

**Ключевые слова:** система критериев, экономическая оценка, срок окупаемости, культуртехническая мелиорация, матрица решений.

**Keywords:** system of criteria, economic evaluation, payback period, kulturtechnik melioration, decision matrix.

Одной из мер по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС стало изъятие высоко загрязненных земель из сельскохозяйственного оборота. В связи с положительной динамикой ради-

ационной обстановки вопрос возврата земель приобретает актуальность. Однако в период изъятия на данных землях развивались процессы культуртехнической деградации. Вторая часть статьи посвящена вопросу экономической оценки целесообразности возврата земель и взаимной увязке результатов обособленных этапов комплексной эколого-экономической оценки. Исследования проведены в период работы в Могилевском филиале РНИУП «Институт радиологии» (Республика Беларусь).

One of the measures to eliminate the consequences of the Chernobyl accident was the exclusion of highly contaminated land from agricultural use. Due to the positive dynamics of the radiation situation, the issue of land return becomes relevant. However, in the period of exclusion of these lands the land clearance degradation