

УДК 631.55:631.354:629.356

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ УБОРОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ АГРЕГАТОВ ПО ПОЛЮ

Назаров Андрей Николаевич
научный сотрудник
РИНЦ SPIN-код 7058-3195
naz.and.nik.1969@yandex.ru

Ревенко Валерий Юрьевич
уч. секретарь, к.т.н.
РИНЦ SPIN-код 6608-9963
skskniish@rambler.ru

*Новокубанский филиал ФГБНУ
«Росинформагротех» (КубНИИТиМ),
Новокубанск, Краснодарский край, Россия*

Обозначены негативные эффекты и проблемы, сопровождающие движение по полю составляющих элементов уборочно-транспортного звена – зерноуборочных комбайнов и грузовых автомобилей. Определено, что локация мест выгрузки в значительной мере определяет интенсивность движения транспорта по полю. Предложен оригинальный алгоритм расчета расположения мест выгрузки бункера зерноуборочного комбайна, который применим для любого сочетания параметров убираемого участка (урожайность, длина гона) и технических характеристик зерноуборочного комбайна (захват жатки, ёмкость зернового бункера). Произведен расчет искомых параметров по предложенному алгоритму применительно к конкретным условиям работы уборочной техники на валидационном полигоне КубНИИТиМ. Приведены результаты полевого эксперимента, полученные с использованием системы спутникового мониторинга, фиксирующей маршруты передвижения комбайнов и автомобилей, которые подтвердили достаточную для практического применения точность предлагаемой методики расчета

Ключевые слова: УБОРОЧНЫЙ ПРОЦЕСС, ЗЕРНОУБОРОЧНЫЙ КОМБАЙН, ГРУЗОВОЙ АВТОМОБИЛЬ, МАРШРУТ, ТРЕКЕР, ПОЛЕ, РАБОЧИЙ ХОД, ВЫГРУЗКА БУНКЕРА

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-191-037>

UDC 631.55:631.354:629.356

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

ALGORITHM FOR CALCULATION OF THE TRAJECTORY OF FIELD MOVEMENT OF HARVEST AND TRANSPORT AGGREGATES

Nazarov Andrey Nikolaevich
Researcher
RSCI SPIN 7058-3195
naz.and.nik.1969@yandex.ru

Revenko Valeriy Yurievich
Academic secretary, Candidate of Technical Sciences
RSCI SPIN code 6608-9963
skskniish@rambler.ru
*Novokubansk branch of F'SBSI "Rosinformagrotekh"
(KubNIITiM), Novokubansk, Krasnodar region, Russia*

The article indicates negative effects and problems accompanying the movement across the field of the constituent elements of the harvesting and transport link - grain harvesters and trucks. It was determined that the location of the unloading places largely determines the intensity of traffic in the field. An original algorithm for calculating the location of the places for unloading combine harvester hopper is proposed, which is applicable for any combination of the parameters of the harvested area (yield, rutting length) and the technical characteristics of the combine harvester (capture of the header, capacity of the grain tank). The study calculates required parameters according to the proposed algorithm in relation to the specific working conditions of harvesting equipment at the validation site of KubNIITiM. The work presents the results of a field experiment obtained using a satellite monitoring system that fixes the routes of movement of combines and cars, which confirmed the accuracy of the proposed calculation method sufficient for practical application

Keywords: HARVESTING PROCESS, COMBINE HARVESTER, TRUCK, ROUTE, TRACKER, FIELD, WORKING STROKE, HOPPER UNLOADING

Введение. Одной из ключевых мер по предотвращению негативного влияния на почву ходовых систем сельскохозяйственной техники является снижение интенсивности движения по полю. Это особенно актуально во время уборки урожая, когда по стерне перемещаются не только зерноуборочные комбайны, но и обслуживающие их грузовые автомобили. К особенностям работы последних следует отнести следующие: выполнение не только транспортных, но и сборочно-транспортных операций; значительная доля времени пребывания на поле (до 40...60 %) в общем балансе времени циклорейса; резкое различие в режимах движения по полю и по дороге [1]. Именно при движении груженых автомобилей по полю происходит наибольшее уплотнение пахотного горизонта, обусловленное его интенсивной деформацией колесами. По мнению некоторых исследователей (Ламанде и др. [2]) на глинистой почве уплотнение грунта может продержаться до 30 лет после единичного проезда транспортного агрегата с максимальной колесной нагрузкой 80 кН и давлением в шинах 700 кПа. В работе Русанова В.А. [3] указывается, что при проезде по стерне груженого автомобиля ЗИЛ-130Б плотность почвы резко возрастает, вызывая соответствующее увеличение удельного сопротивления обработки почвы плугом на 60,4 %.

Интенсивность движения по полю складывается из перемещений комбайна и транспортного средства, его обслуживающего. В результате их совместного движения следами покрывается большая часть площади поля. В работе [4] показано, что 43,8 % этой площади подвергались уплотнению колесными ходовыми системами не менее одного раза, при колесной нагрузке от 50 до 62,5 кН. Данная нагрузка способствует резкому повышению твердости почвы в колеях уборочной техники. Так в работе [5] установлено, что твердость почвы по следам комбайна ACROS 550 в слое 0-30 см возрастает при заполненном бункере в 1,9 раза (с 1,08 до 2,03 МПа).

Пробег техники по полю зависит от состава уборочно-транспортного комплекса, размеров поля, ёмкости бункера зерноуборочного комбайна, грузоподъемности автотранспорта и множества других факторов [6]. Снижение интенсивности движения являются важными мерами по уменьшению вредного уплотнения почвы. Поэтому важно правильно оценивать интенсивность движения техники по полю, с последующей оптимизацией перемещений транспортных средств.

Длины плеч подъезда к комбайну и отвоза зерна могут различаться в зависимости от размера и геометрической формы поля, а также от урожайности убираемой культуры. Последняя влияет на длину рабочего хода, на которой происходит полная загрузка бункера и которая определяет положение комбайна в конце отдельного уборочного цикла. Увеличение урожайности сократит расстояние между циклами наполнения-разгрузки бункера, но приведет к увеличению их количества, одновременно возрастет и число транспортных циклов и общего объема транспортных перевозок по полю.

Но, если перемещение зерноуборочного комбайна строго регламентировано, так как он должен убрать урожай с площади всего поля, то от организации работы транспортного звена напрямую зависит количество следов грузовых автомобилей, оставленных на поле. Расчет составляющих уборочно-транспортного цикла, проходящих по сельхозугодьям – важная и актуальная задача, способствующая снижению интенсивности движения по полю, а следовательно – уменьшению негативного воздействия движителей на структуру и физическое состояние пахотного и подпахотного горизонтов почвы.

Особую актуальность данная проблема приобретает в случае снижения несущей способности почвы, являющейся опорным основанием для движителей комбайнов и автотранспорта, обусловленной неблагоприятным сочетанием погодных факторов.

Цель данного исследования заключается в разработке математической модели для определения длины пути по полю транспортных средств, работающих в составе уборочно-транспортных звеньев в условиях степной зоны ЮФО.

Материалы и методы. Траектории движения по полю транспортных средств, обслуживающих уборочное звено, напрямую зависят от дислокации на убираемом участке мест (точек) выгрузки комбайнов. Поэтому нахождение координат данных точек позволит вычислить длины плеч подвоза и отвоза зерна от комбайна.

Для решения поставленной задачи авторами предлагается алгоритм расчета, который применим для любого сочетания параметров поля (урожайность, длина гона) и технических характеристик зерноуборочного комбайна (ширина захвата жатки, ёмкость зернового бункера).

В качестве исходных данных приняты следующие параметры:

- характеристика зерноуборочного комбайна – рабочая ширина жатки B , м и вместимость бункера V , м³;

- характеристика поля (участка) – длина гона L_r , м, урожайность культуры $У$, кг/м² и её удельная масса γ , кг/м³, число гонов в загонке N .

На рисунке 1 приведена схема поля, необходимая для наглядного представления расчетного алгоритма. Линии А (Б) – условные линии, обозначающие противоположные границы убираемого массива культуры (края поля).

Очевидно, что расположение мест выгрузки бункера определяется порядковым номером гона от начала движения комбайна по массиву и расстоянием от края поля, которые в свою очередь определяется соотношением длины рабочего хода комбайна и длины гона. Значение данного соотношения может быть как больше единицы, и тогда в пределах гона располагаются в среднем менее одного места выгрузки, так и меньше

единицы – тогда в пределах гона располагаются в среднем более одного места выгрузки.

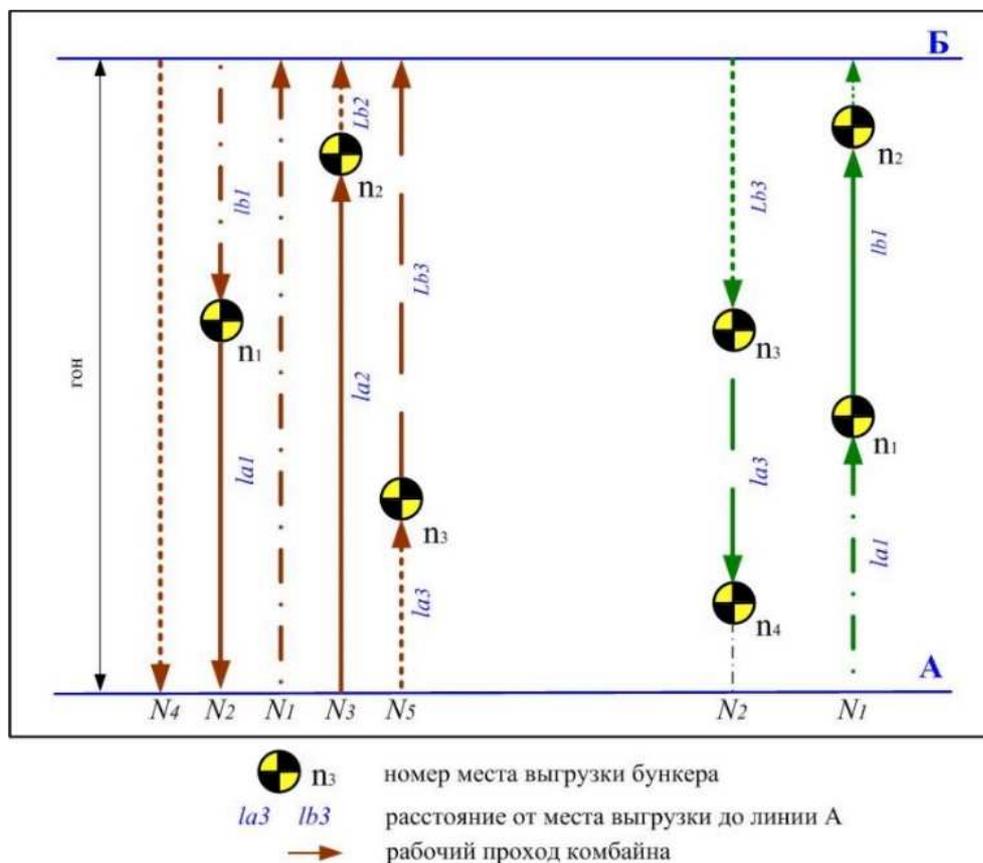


Рисунок 1 – Схема вариантов расположения мест выгрузки бункера комбайна

Алгоритм расчета показателей будет выглядеть следующим образом.

1. Определяем длину рабочего хода комбайна $L_{p.x.}$, м:

$$L_{p.x.} = \frac{V \cdot \gamma}{B \cdot y} \quad (1)$$

2. Рассчитываем число рабочих ходов комбайна в загонке $m_{p.x.}$:

$$m_{p.x.} = \frac{N \cdot L_{\Gamma}}{L_{p.x.}} \quad (2)$$

Отметим, что число рабочих ходов $m_{p.x.}$ тождественно числу выгрузок

бункера n , т.е. показатель $m_{p.x.}$ определяет число выгрузок бункера в пределах заданного числа гонов N .

3. Исходя из этого, вычисляем расстояние от i -ой выгрузки бункера до края поля l_i :

$$l_i^{A(B)} = L_{\Gamma} \cdot \left(\frac{n_i \cdot L_{p.x.}}{L_{\Gamma}} - \left\lfloor \frac{n_i \cdot L_{p.x.}}{L_{\Gamma}} \right\rfloor \right) \quad (3)$$

Математический символ (знак) $\lfloor \]$ в формуле обозначает округление в меньшую сторону.

При необходимости, можно также определить номер гона N_i , на котором произошла i -я выгрузка бункера:

$$N_i = \left\lceil \frac{m_{p.x.}^i \cdot L_{p.x.}}{L_{\Gamma}} \right\rceil \quad (4)$$

Математический символ $\lceil \]$ в формуле 4 обозначает округление результата в большую сторону.

Проверку предлагаемого алгоритма проводили в условиях реального уборочного процесса по сбору урожая озимой пшеницы на валидационном полигоне Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (КубНИИТиМ).

Для регистрации всего полевого и дорожного движения во время уборки зерноуборочные комбайны и транспортные средства были оснащены трекерами системы спутникового мониторинга СКАУТ, позволяющими контролировать передвижение техники в режиме реального времени. Кроме того, изучались треки за прошлые периоды, регистрирующие координаты, скорость и направлением передвижения техники.

По результатам мониторинга были сформированы отчеты в табличной и графической форме, оценивающие работоспособность уборочно-транспортного звена как в целом, так и каждой из его составляющих.

Уборка урожая проводилась комбайнами ACROS 550. Отвоз зерна от

комбайнов осуществлялся самосвалами ЗИЛ-ММЗ-554, технологическая ёмкость кузова которого была практически равна вместимости зернового бункера комбайна. Технические характеристики вышеназванной техники широко известны, поэтому в статье не приводятся.

Результаты исследований и обсуждение.

Произведем расчет искомых параметров по предложенному алгоритму применительно к конкретным условиям работы уборочной техники на поле №1.1 валидационного полигона КубНИИТиМ.

В качестве исходных параметров возьмем следующие:

- характеристика участка: длина гона $L_{\Gamma} = 800$ м, урожайность $Y = 0,6$ кг/м², удельная масса зерна $\gamma = 780$ кг/м³, число гонов в загонке $N = 21$;

- характеристика комбайна: рабочая ширина захвата жатки $B = 7$ м, вместимость бункера $V = 9$ м³.

1. В этом случае длина рабочего хода комбайна:

$$L = \frac{V \cdot \gamma}{B \cdot Y} = \frac{9 \cdot 780}{7 \cdot 0,6} = 1671 \text{ м}$$

2. Число рабочих ходов в загонке:

$$m_{\text{р.х.}} = \frac{N \cdot L_{\Gamma}}{L_{\text{р.х.}}} = \frac{10 \cdot 800}{1671} = 10,1$$

При тождестве значений числе рабочих ходов $m_{\text{р.х.}}$ числу выгрузок бункера n_i имеем, что в 21 гонах загонки производится 10 полных выгрузок бункера, имеющих порядковую нумерацию от 1 до 10.

3. Расстояние от места 1-ой выгрузки бункера до края поля (линии А):

$$\begin{aligned} L_{n_1}^A &= L_{\Gamma} \left(\frac{n_1 \cdot L_{\text{р.х.}}}{L_{\Gamma}} - \left\lfloor \frac{n_1 \cdot L_{\text{р.х.}}}{L_{\Gamma}} \right\rfloor \right) = 800 \cdot \left(\frac{1 \cdot 1671}{800} - \left\lfloor \frac{1 \cdot 1671}{800} \right\rfloor \right) = \\ &= 800 \cdot (2,09 - 2) = 800 \cdot 0,09 = 72 \text{ м} \end{aligned}$$

Расстояние от места 2-ой выгрузки бункера до края поля (линии А):

$$L_{n_2}^A = 800 \cdot \left(\frac{2 \cdot 1671}{800} - \left\lfloor \frac{2 \cdot 1671}{800} \right\rfloor \right) = 800 \cdot (4,18 - 4) = 800 \cdot 0,18 = 144 \text{ м.}$$

В круглых скобках необходимо уменьшаемое оставлять без округления, а вычитаемое и результат – округлять до целого. Аналогичные расчеты произведем, например до 10-й выгрузки.

Номер гона, на котором произошла первая выгрузка бункера n_1 :

$$N_1 = \left\lceil \frac{n_1 \cdot L_{p.x.}}{L_r} \right\rceil = \left\lceil \frac{1 \cdot 1671}{800} \right\rceil = [2,09] = 3$$

Номер гона, на котором произошла вторая выгрузка бункера n_2 :

$$N_2 = \left\lceil \frac{2 \cdot 1671}{800} \right\rceil = [4,18] = 5$$

Окончательные результаты представим в виде таблицы:

Таблица – Координаты мест выгрузки бункера

Номер выгрузки бункера	Номер гона	Расстояние, м от линии	
		А	Б
1	3	72	728
2	5	144	656
...
9	19	639	161
10	21	710	90
Всего	-	3905	4095
Среднее	-	391	409

Результаты проведенного расчета свидетельствуют о том, что в пределах 21 гона производится 10 полных выгрузок бункера, при этом среднее расстояние транспортирования зерна от линии А на 19 м (или на 4,6 %) меньше, чем от линии Б, что говорит о примерно равноудаленной локации мест выгрузки бункера от границ участка при заданных условиях.

Проверку полученных результатов проведем путем сопоставления расчетных данных с результатами спутникового мониторинга маршрутов движения по полю зерноуборочных комбайнов и обслуживающих их грузовых автомобилей.

На рисунке 2 приведены треки грузовых автомобилей ЗИЛ-ММЗ-554. Отметим, что типичный полевой транспортный цикл состоит из четырех

частей: 1 – ожидание автомобилем загрузки бункера комбайна на краю поля, 2 – подача транспортного средства от границы поля до места позиционирования уборочной машины, 3 – выгрузка зерна из бункера в кузов, 4 – следование загруженного транспорта обратно к границе поля.

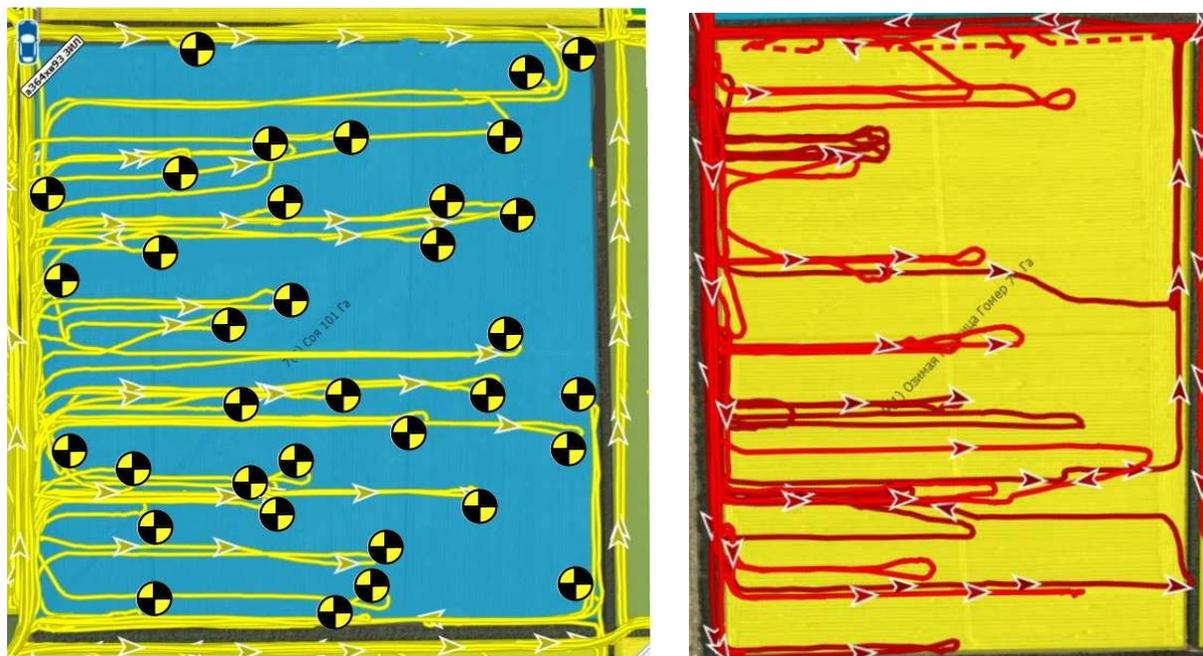


Рисунок 2 – Траектории движения и места загрузки на поле грузовых автомобилей ЗИЛ-ММЗ-554 (слева – поле 1.1, справа – поле 1.3.)

В результате измерений составляющих полевого цикла движения автотранспорта на отвозе зерна от комбайна было выявлено, что среднее плечо подъезда автомобиля к комбайну от края поля (линии А) составило 411 м, что на 5% выше приведенного в таблице расчетного показателя (391 м). Учитывая некоторую закругленность траектории движения автомобиля при подъезде к комбайну для забора зерна, мы можем констатировать сходство расчетных и измеренных показателей.

Таким образом, среднее плечо подъезда автомобиля к комбайну от края поля примерно равно половине длины гона. Точно также и усредненная локация места выгрузки комбайна за несколько уборочных циклов – середина убираемого массива. Данный вывод подтверждается

результатами спутникового мониторинга и сформированным отчетам в графической форме. Так на поле №1.3 валидационного полигона усредненная длина плеча загрузки автотранспорта от края массива составила 520 м (середина массива располагалась в 491 м от края), для поля №3.2 длина плеча составила 382 м (середина массива располагалась в 360 м от края).

Выводы

Предложенный алгоритм расчета расположения мест выгрузки бункера зерноуборочного комбайна применим для любого сочетания: размерных параметров поля, урожайности убираемой культуры и технических характеристик уборочной машины (ширины захвата жатки, вместимости бункера), при работе загонным или челночным способами. Он также позволяет предварительно оценить локацию мест выгрузки бункера и учесть результат при планировании и организации транспортных работ.

Результаты вычислений достаточно хорошо подтверждаются фактическими данными полевого эксперимента, полученными с использованием системы спутникового мониторинга на полях валидационного полигона КубНИИТиМ – расхождение опытных данных с предварительно рассчитанными составляет не более 5%.

Полученная в результате расчета характеристика расположения мест выгрузки в виде номера гона и значения расстояний от мест выгрузки каждого бункера до противоположных сторон поля позволяет в определенных случаях оптимизировать отвоз зерна автотранспортом – с одной или двух сторон поля, с целью исключения излишнего пробега порожнего и груженого автомобиля, а также снизить издержки на проведение последующих почвообрабатывающих операций.

Разработанный инструментарий в перспективе создаст основу для разработки и введения в практику хозяйствования нового комплексного

технологического показателя эффективности проведения уборочных работ – степени локализации мест выгрузки комбайнов, имеющего индивидуальную характеристику для каждого сочетания элементов системы «геометрия поля-урожайность культуры-параметры комбайна».

Список литературы

1. Табашников А. Т. Организация уборки зерновых и кормовых культур. – М. Агропромиздат, 1985. – 159 с.
2. Lamande M., Berisso F., Alakukku L., Wildenschild D., Schjønning P. 2012. Subsoil compaction of a clay soil persists three decades after heavy wheel traffic. In: NJF Seminar 448: Soil Compaction – Effects on Soil Functions and Strategies for Prevention, Helsinki, Finland, 6-8 March 2012. NJF Report 8 (1), pp. 49–52.
3. Русанов В. А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения -М. -ВИМ - 1998. - 368 с.
4. Augustin K., Kuhwald M., Brunotte J., Duttmann R. Wheel Load and Wheel Pass Frequency as Indicators for Soil Compaction Risk: A Four-Year Analysis of Traffic Intensity at Field Scale. *Geosciences*. 2020; 10 (8):292. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080292>
5. Ревенко, В. Ю. Изменение твердости почвы под воздействием колес зерноуборочного комбайна ACROS 550 / В. Ю. Ревенко, В. И. Скорляков, Т. А. Юрина // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 1 (307). – С. 16-20. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-1-16-20. – EDN TVQOCZ.
6. Капланович М.С. Справочник по сельскохозяйственным транспортным работам. - М.: Россельхозиздат, 1982 – 315 с.

References

1. Tabashnikov A. T. Organizacija uborki zernovyh i kormovyh kul'tur. – М. Agropromizdat, 1985. – 159 s.
2. Lamande M., Berisso F., Alakukku L., Wildenschild D., Schjønning P. 2012. Subsoil compaction of a clay soil persists three decades after heavy wheel traffic. In: NJF Seminar 448: Soil Compaction – Effects on Soil Functions and Strategies for Prevention, Helsinki, Finland, 6-8 March 2012. NJF Report 8 (1), pp. 49–52.
3. Rusanov V. A. Problema pereuplotnenija pochv dvizhiteljami i jeffektivnye puti ee reshenija -M. -VIM - 1998. - 368 s.
4. Augustin K., Kuhwald M., Brunotte J., Duttmann R. Wheel Load and Wheel Pass Frequency as Indicators for Soil Compaction Risk: A Four-Year Analysis of Traffic Intensity at Field Scale. *Geosciences*. 2020; 10 (8):292. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080292>
5. Revenko, V. Ju. Izmenenie tverdosti pochvy pod vozdejstviem koles zernouborochnogo kombajna ACROS 550 / V. Ju. Revenko, V. I. Skorljakov, T. A. Jurina // Tehnika i oborudovanie dlja sela. – 2023. – № 1 (307). – S. 16-20. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-1-16-20. – EDN TVQOCZ.
6. Kaplanovich M.S. spravocnik po sel'skohozjajstvennym transportnym rabotam. - M.: Rossel'hozizdat, 1982 – 315 s.