



# Biogeosystem Technique

Journal is being issued since 2014. ISSN 2409-3386, E-ISSN 2413-7316  
2015. Vol.(6). Is. 4. Issued 4 times a year

## EDITORIAL BOARD

**Dr. Kalinichenko Valery** – Institute of Soil Fertility of South Russia, Persianovsky, Russian Federation (Editor-in-Chief)

**Dr. Blagodatskaya Evgeniya** – Institute of Physical Chemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation

**Dr. Elizbarashvili Elizbar** – Iakob Gogebashvili Telavi State University, Telavi, Georgia

**Dr. Glazko Valery** – Moscow agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Russian Federation

**Dr. Lisetsky Fedor** – Belgorod State University, Russian Federation

**Dr. Minkina Tatiana** – Southern Federal University, Russian Federation

**Dr. Okolelova Alla** – Volgograd State Technical University, Russian Federation

**Dr. Shein Evgeny** – Moscow State University named M.V. Lomonosov, Russian Federation

**Dr. Surai Peter** - Feed-Food.ltd, Scotland, UK

The journal is registered by Federal Service for Supervision of Mass Media, Communications and Protection of Cultural Heritage (Russian Federation).

Journal is indexed by: **Cross Ref** (USA), **Electronic scientific library** (Russia), **Open Academic Journals Index** (Russia), **CiteFactor – Directory of International Research Journals** (Canada), **Universal Impact Factor** (Australia).

All manuscripts are peer reviewed by experts in the respective field. Authors of the manuscripts bear responsibility for their content, credibility and reliability.

Editorial board doesn't expect the manuscripts' authors to always agree with its opinion.

Postal Address: 26/2 Konstitutsii, Office 6  
354000 Sochi, Russian Federation

Website: <http://ejournal19.com/en/index.html>  
E-mail: [evr2010@rambler.ru](mailto:evr2010@rambler.ru)

Founder and Editor: Academic Publishing  
House *Researcher*

Passed for printing 15.12.15.  
Format 21 × 29,7/4.

Headset Georgia.  
Ych. Izd. l. 5,1. Ysl. pech. l. 5,8.

Order № B-6.

**Biogeosystem  
Technique**

2015

Is. 4



Издается с 2014 г. ISSN 2409-3386, E-ISSN 2413-7316  
2015. № 4 (6). Выходит 4 раза в год.

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Валерий Калининченко** – Институт плодородия почв юга России, Персиановский, Персиановский, Российская Федерация (Гл. редактор)

**Благодатская Евгения** – Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Российская Федерация

**Глазко Валерий** – МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация

**Лисецкий Федор** – Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация

**Минкина Татьяна** – Южный федеральный университет, Российская Федерация

**Окоелова Алла** – Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация

**Сурай Петр** – компания Фит-фуд лтд., Скотланд, Соединенное Королевство

**Шеин Евгений** – МГУ имени Ломоносова, Российская Федерация

**Элизбаршвили Элизбар** – Телавский государственный университет, Телави, Грузия

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия (Российская Федерация).

Журнал индексируется в: **Cross Ref** (США), **Научная электронная библиотека** (Россия), **Open Academic Journals Index** (Россия), **CiteFactor – Directory of International Reseach Journals** (Канада), **Universal Impact Factor** (Австралия).

Статьи, поступившие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы публикаций.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.

Адрес редакции: 354000, Россия, г. Сочи,  
ул. Конституции, д. 26/2, оф. 6

Сайт журнала: <http://ejournal19.com/>  
E-mail: [evr2010@rambler.ru](mailto:evr2010@rambler.ru)

Учредитель и издатель: ООО «Научный  
издательский дом "Исследователь"» - Academic  
Publishing House *Researcher*

Подписано в печать 15.12.15.  
Формат 21 × 29,7/4.

Гарнитура Georgia.  
Уч.-изд. л. 5,1. Усл. печ. л. 5,8.

Заказ № В-6.

## CONTENTS

**Relevant Topic**

- Reproductive “Success” and Population-Genetic Consequences of Environmental Stress on the Example of Accidents in Chernobyl and Fukushima  
Valery I. Glazko, Tatiana T. Glazko ..... 316

**Articles and Statements**

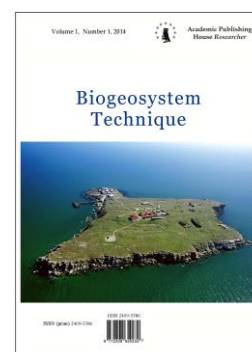
- The Influence of Soil Physical and Chemical Characteristics on Bioavailability of  $^{60}\text{Co}$   
Vyacheslav S. Anisimov, Dmitry V. Dikarev, Lidia N. Anisimova,  
Yury N. Korneev, Ilja V. Kochetkov ..... 327
- Thermodynamic Status of Strontium in Chernozem at Application of Phosphogypsum  
Anatoly P. Endovitsky, Tatyana M. Minkina, Valery P. Kalinitchenko ..... 345
- Genomic Scanning Using the Retrotransposon Fragments as "Anchors",  
in Animals and Plants  
Valery I. Glazko, Maria A. Elkina, Tatiana T. Glazko ..... 363
- The Green Manure as a Factor of Agriculture Biologization  
and Nature-Similar Agrotechnology  
Vladimir G. Loshakov ..... 374
- Soil Saturated Hydraulic Conductivity Assessment by Direct  
and Pedotransfer Functions Methods  
Evgeny V. Shein, Ahmed Y. Mady, El Hassna A. Mohamed ..... 396

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation  
Biogeosystem Technique  
Has been issued since 2014.  
ISSN: 2409-3386  
E-ISSN: 2413-7316  
Vol. 6, Is. 4, pp. 316-326, 2015

DOI: 10.13187/bgt.2015.6.316  
[www.ejournal19.com](http://www.ejournal19.com)



### Relevant Topic

UDC 575.82

## Reproductive “Success” and Population-Genetic Consequences of Environmental Stress on the Example of Accidents in Chernobyl and Fukushima

<sup>1</sup>Valery I. Glazko

<sup>2</sup>Tatiana T. Glazko

<sup>1-2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, Russian Federation

<sup>1-2</sup> Center of Experimental Embryology and Reproductive Biotechnologies, Russian Academy of Agricultural Science, 127422, Kostyakow st., 12, Bl. 4, Moscow, Russian Federation

<sup>1</sup> Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of Russian Academy of Science (foreign participator)

E-mail: [vglazko@yahoo.com](mailto:vglazko@yahoo.com)

<sup>2</sup> Dr. of Agricultural Sciences, Professor, Senior Researcher

E-mail: [tglazko@rambler.ru](mailto:tglazko@rambler.ru)

### Abstract

The analysis of inheritance of ISSR-PCR markers, the frequency of the cytogenetic anomaly occurrences in two generations (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>) of cattle which were born in the experimental vivarium of the "Novoshepelichy" in the conditions of high levels of ionizing irradiation in the result of the accident on the Chernobyl Nuclear Power Plant was carried out. Genotyping was performed with using as primers in polymerase chain reaction the fragments of 5 dinucleotide and 6 trinucleotide microsatellite loci, in total on the 162 genomic DNA fragments flanked by inverted repeats of microsatellites. On average, the proportion of polymorphic loci, polymorphic information content (PIC) of the spectra of amplification products were not reduced in two generations of descendants in compared with the parent generation (F<sub>0</sub>), despite the all animals had the same father (F<sub>0</sub>). Average PIC values from the spectra of amplicons of all 11 primers revealed a significant increase in PIC per locus per individual in the F<sub>2</sub> generation compared to the F<sub>0</sub> generation ( $P < 0.001$ ). The decrease of the cytogenetic anomaly frequencies in blood cells in F<sub>1</sub> and F<sub>2</sub> generations was observed, that corresponded to identified in different species which reproduced in a number of generations in conditions of chronic action of unfavourable environmental stress factors (zones of "risky breeding" in South Gobi – cattle, sheep, yaks; a high level of radioactive contamination – species of voles). The obtaining data indicated that such conditions lead to the preferred reproduction of multi-locus heterozygotes in the spectra of DNA markers and animals with a relatively increased stability of the chromosomal apparatus. The prospects of using the reproduction success of the carriers of these characteristics as an integral indicator of selective effect of environmental stress factors were discussed.

**Keywords:** ionizing radiation, ISSR-PCR markers, cytogenetic anomalies, reproductive "success", ecological stress

### **Введение**

Экологические изменения лежат в основе преобразования внутренних структур отдельных видов, видовых сообществ, и, в конечном итоге, событий макроэволюционного ранга. В связи с техническим прогрессом, увеличением антропогенного загрязнения, экологические изменения приобрели глобальный масштаб. В этой связи особую важность приобретает выяснение последствий для биоты такого масштабного радионуклидного загрязнения, как авария на Чернобыльской АЭС, оценка которых до сих пор остается дискуссионной [1]. Более того, в результате международной конференции Европейского Комитета по оценке радиационных рисков проведенной 6-го мая 2009 г. в Лесвосе, Греция, опубликована декларация, получившая название «Лесвосовской Декларации», центральным положением которой является утверждение о необходимости разработки новой теории рисков, связанных с ионизирующим излучением [2]. В этой декларации отмечается, что стандарты оценок таких рисков были разработаны достаточно давно, до многих существенных открытий биологических эффектов радионуклидов, механизмов их реализации и модификаций. Кроме того, ряд исследователей полагает, что необходима разработка новой парадигмы оценок последствий биологических эффектов ионизирующего излучения в низкодозовом диапазоне [3, 4]. В то же время, представление о таком диапазоне достаточно условно, поскольку зависит от фонового уровня ионизирующего облучения объекта, характеристик радиочувствительности клеток и тканей, видовой принадлежности, острого или хронического воздействия и т.д. Проблема осложняется еще и тем, что до сих пор остаются недостаточно изученными вопросы внутривидовой гетерогенности по радиоустойчивости, спектры прямых и косвенных внутриклеточных мишеней действия ионизирующего облучения, последствия повреждения разных мишеней и клеточных популяций для многоклеточных организмов.

К настоящему времени наиболее подробный многолетний обзор последствий для здоровья человека действия резкого повышения ионизирующего облучения представлен в работах японских исследователей под общим названием «От Хиросимы и Нагасаки до Фукусимы» [5–6]. Важным результатом, который требует объяснений, является тот факт, что несмотря на многочисленные данные о мутациях в соматических клетках, развитии раковых и нераковых заболеваний у людей, попавших под резкое увеличение ионизирующего излучения, у детей, рожденных от родителей, получивших высокие дозы ионизирующего облучения, не обнаруживается повышенной смертности или онкологических заболеваний [7–9].

Очевидно, что оценка риска ионизирующего облучения могла бы быть существенно упрощена в случае выявления интегрального показателя его повреждающего действия на многоклеточный организм. К настоящему времени в качестве таких показателей используют, в основном, частоту встречаемости онкологических заболеваний, цитогенетических аномалий, врожденных уродств [10–12]. В то же время, характеристикой, обобщающей состояния всех уровней организации многоклеточного организма, может быть его репродуктивный «успех», или приспособленность в популяционно-генетическом понятии – вклад аллельных вариантов по разным генам в следующее поколение по сравнению с частотой его представленности в родительском поколении. Для того, чтобы оценить возможность использования такого подхода, в настоящей работе выполнен анализ распределения вариантов длин фрагментов ДНК, фланкированных инвертированными повторами микросателлитов (Inter-Simple Sequence Repeats – ISSR-PCR маркеры), а также некоторых типов цитогенетических аномалий в поколениях крупного рогатого скота чернопестрой голштинизированной породы, воспроизводившихся в условиях повышенного уровня ионизирующего излучения экспериментального вивария «Новошепеличи», получавших дозы ионизирующего излучения около 0,7 – 0,8 Гр/год. Для сравнения в работу включены данные по частотам цитогенетических аномалий в клетках крови групп крупного рогатого скота, овец и яков, воспроизводящихся в условиях экологического стресса (зона рискованного животноводства, Южное Гоби).

## Материалы и методы

Семейный анализ полиморфизма и наследования ISSR-PCR маркеров выполнялся на материале (замороженные образцы крови) поколений черно-пестрого голштинизированного скота, воспроизводящегося в экспериментальном виварии «Новошепеличи», в 10-км зоне отчуждения (200 Ки/км<sup>2</sup>) Чернобыльской АЭС, представленных восемью семьями, три из которых берут начало от животных, переживших аварию в этой же местности: коров Альфы, Беты и Гаммы, остальные пять – от черно-пестрого голштинизированного скота, завезенного в «Новошепеличи» из относительно чистых полесских районов Украины. В анализ включены образцы крови 34 животных, представляющих родительское и 2 поколения, рожденные в условиях действия низкодозового хронического излучения (0,7 – 0,8 Гр/год, [13]). Все животные, за исключением Альфы, Беты, Гаммы и пяти полесских коров с идентификационными номерами 6803, 6824, 6827, 6843 и 4789, являющихся родоначальницами семей, происходят от одного производителя – быка Урана, также пережившего аварию в этой же местности. Подробные родословные животных, включенных в исследования, представлены в [14].

Выполнены исследования мазков периферической крови группы крупного рогатого скота экспериментального вивария «Новошепеличи», а также местного монгольского крупного рогатого скота, овец и яков из разных эколого-географических регионов Монголии (северо-запад Монголии, район Хубсугул, биосферный заповедник; юг Монголии, район, примыкающий к пустыне Гоби – зона рискованного животноводства). Образцы крови животных Монголии для исследований предоставлены д.б.н. Ю.А. Столповским (Институт общей генетики имени Н.И. Вавилова РАН).

Для проведения полимеразной цепной реакции (ПЦР, PCR) из образцов крови выделяли геномную ДНК, в качестве праймеров в реакционную смесь добавляли фрагменты ди- и тринуклеотидных микросателлитных локусов: (AC)<sub>9</sub>G, (GA)<sub>9</sub>C, (CT)<sub>9</sub>G, (AGC)<sub>6</sub>G, (AGC)<sub>6</sub>C, (ACC)<sub>6</sub>G, (CTC)<sub>6</sub>C, (CTC)<sub>6</sub>A, (CAC)<sub>7</sub>A, (CAC)<sub>7</sub>T, GT(CAC)<sub>7</sub>. PCR проводили на амплификаторе «Терцик, ДНК Технология» (Россия) с применением набора сухих реагентов для PCR амплификации ДНК GenePak™ PCR Core (Изоген, Москва). Для всех образцов собирали смеси PCR амплификации, отдельно для каждого из указанных праймеров. Условия PCR: первоначальная денатурация 2 мин при 95°C; денатурация при 95°C – 30 сек, отжиг при 55°C – 30 сек, синтез при 72°C – 2 мин (37 циклов); завершающий синтез при 72°C – 7 мин. Фракционирование продуктов амплификации проводили в 2 %-ном агарозном геле с применением в качестве ДНК маркера GeneRuler™ 100 bp DNA Ladder Plus (MBI Fermentas, USA) для оценки длины продуктов PCR амплификации. Визуализацию продуктов PCR амплификации проводили под ультрафиолетовым излучением на трансиллюминаторе после окрашивания гелей бромистым этидием.

Мазки крови готовили следующим образом. Каплю периферической крови смешивали с каплей физиологического раствора на предметном стекле в соотношении по объему 1:1, затем распределяли равномерно по всему предметному стеклу. Препараты высушивали и далее фиксировали метиловым спиртом в течение 30 мин. Препараты окрашивали красителем Гимза (фирмы Merck). Количество двуядерных лимфоцитов (ДЯ) и одноядерных лимфоцитов с микроядрами (МЯ) подсчитывали на препаратах в клетках с сохраненной цитоплазмой. Количество митозов (митотический индекс – МИ), частоты встречаемости ДЯ, МЯ рассчитывали в 3000 клеток и выражали в промилях (‰). Количество эритроцитов с микроядрами (ЭМЯ) рассчитывали в 3000 эритроцитов и выражали в промилях (‰). Для исследований препаратов использовали бинокулярный микроскоп фирмы Motik со встроенным цифровым фотоаппаратом при увеличении в 1000 раз.

Статистическую достоверность межгрупповых отличий оценивали по критерию Стьюдента (*t*<sub>s</sub>).

## Результаты и обсуждение

В результате использования в ПЦР в качестве праймеров фрагментов 3-х динуклеотидных и 8-ми тринуклеотидных микросателлитов получены спектры продуктов амплификации фрагментов ДНК (ампликонов), фланкированных инвертированными повторами. Каждый фрагмент ДНК рассматривался как отдельный геномный локус, отсутствие фрагмента в спектре данного праймера учитывалось как

гомозигота по рецессивному аллелю, присутствие – как присутствие либо гомозиготы по доминантному аллелю, либо гетерозиготы. Суммарно во всех спектрах ампликонов, полученных при использовании в ПЦР всех праймеров, позволил получить 162 таких фрагмента, воспроизводящихся не менее чем в трех повторностях ПЦР одних и тех же образцов ДНК. 134 таких ампликонов оказались полиморфными по своему присутствию/отсутствию в спектрах продуктов амплификации, полученных на ДНК у разных животных. Диапазон молекулярных масс выявленных ампликонов колебался от минимального в 275 пар нуклеотидов (пн) до максимального в 3200 пн. Максимальное количество локусов было выявлено с использованием праймеров GT(CAC)7 (24 ампликона), (ACC)6G (19 ампликонов), (AGC)6C (19 ампликонов) и (GA)9C (18 ампликонов). Наибольшая доля полиморфных локусов была выявлена в спектрах ампликонов, полученных в ПЦР с праймерами (CTC)6A ( $P=0,933$ ) и (CAC)7A ( $P=0,866$ ).

Далее все животные были подразделены в соответствии с их происхождением на три группы: F<sub>0</sub> – родительское поколение, родившееся до аварии; F<sub>1</sub> – первое поколение родившееся от родителей F<sub>0</sub> в условиях экспериментального вивария «Новошепеличи» в условиях повышенного уровня ионизирующего облучения и F<sub>2</sub> – потомки F<sub>1</sub>. В спектрах ампликонов 4-х праймеров выявлено уменьшение доли полиморфных локусов в поколении F<sub>2</sub> (праймеры (GA)9C, (CT)9G, (CTC)6C и (CTC)6A, табл. 1), в двух – увеличение (праймеры (AGC)6G и (CAC)7A). Для 4-х праймеров статистически достоверным было увеличение доли полиморфных локусов в поколении F<sub>1</sub> по сравнению с F<sub>0</sub>, но для трех из них в поколении F<sub>2</sub> доля полиморфных локусов снижалась (GA)9C, (CTC)6C и (CTC)6A, а для (AGC)6G – наоборот, увеличивалась. То есть, изменения показателя доли полиморфных локусов в поколениях были разнонаправлены и специфичны для каждого праймера. В целом, в поколении F<sub>1</sub> по сравнению с F<sub>0</sub> не отмечено изменений по доле полиморфных локусов для 6-ти из 11 использованных праймеров, а в поколении F<sub>2</sub> – для 4-х (табл. 1).

Таблица 1

**Доля полиморфных локусов, выявленных с использованием различных праймеров в ПЦР, в каждом поколении исследуемых групп животных. F<sub>0</sub> – родительское поколение, родившееся до аварии; F<sub>1</sub> – первое поколение родившееся от родителей F<sub>0</sub> в условиях экспериментального вивария «Новошепеличи» в условиях повышенного уровня ионизирующего облучения и F<sub>2</sub> – потомки F<sub>1</sub>**

№	Праймер	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
1	(AC)9G	0,789±0,241	0,434±0,134**	0,633±0,057**
2	(GA)9C	0,651±0,041	0,692±0,089***	0,477±0,079***
3	(CT)9G	0,035±0,012	0,068±0,051	0,048±0,027
4	(AGC)6G	0,361±0,065***	0,689±0,077***	0,733±0,041***
5	(AGC)6C	0,574±0,090	0,436±0,211	0,653±0,057
6	(ACC)6G	0,817±0,337	0,331±0,233	0,575±0,091
7	(CTC)6C	0,795±0,085*	0,586±0,102*	0,475±0,175*
8	(CTC)6A	0,240±0,135**	0,498±0,042**	0,477±0,100**
9	(CAC)7A	0,571±0,161*	0,166±0,088***	0,895±0,018***
10	(CAC)7T	0,428±0,142	0,346±0,021	0,380±0,078
11	GT(CAC)7	0,745±0,072**	0,679±0,107	0,540±0,179**

Примечание: \*  $P < 0,05$ , \*\*  $P < 0,01$ , \*\*\*  $P < 0,001$ .

Выполнено сравнение спектров продуктов амплификации суммарно у группы животных разных поколений, рожденных коровами, непосредственно пережившими аварию (Альфа, Бета и Гамма) и второй группы, рожденных коровами, завезенными в экспериментальный виварий позднее из относительно чистых районов Полесья (инвентарные номера 6803,6824,6827,6843 и 4789). Обнаружено, что доля полиморфных локусов, выявленных у животных первой группы статистически достоверно выше ( $P < 0,001$ ), чем у потомства коров, завезенных в хозяйство позднее из полесских районов.

У последней группы в спектрах ампликонов, полученных с использованием праймеров (GA)9C, (ACC)6C, (CTC)6C, (CAC)7T, (AGC)6C выявлено существенно меньшее количество фрагментов ДНК. Тем не менее, в обеих группах, с учетом всех выявленных 162 локусов, не обнаружено статистически достоверных изменений показателя доли полиморфных локусов от поколения к поколению. Полученные данные свидетельствуют о том, что в группах животных, рожденных от одного и того же отца (быка Урана) в условиях действия низкодозового хронического облучения, размах генетической изменчивости, определяемый по доле полиморфных локусов, вопреки близкородственному происхождению, поддерживается в трех поколениях на одном уровне.

Далее выполнили сравнительный анализ полиморфного информационного содержания ампликонов каждого спектра, полученного с применением разных праймеров. Рассчитан индекс PIC (Polymorphic Information Contents) по формуле для диаллельных локусов, для которых  $PIC=2f(1-f)$ , где  $f$  – частота рецессивного аллеля, рассчитанная по частотам встречаемости животных, с отсутствием в спектре продуктов амплификации фрагмента ДНК определенной длины. Полученные величины PIC для каждого локуса усредняли по всем ампликонам спектров одного праймера у исследованных групп животных. Сравнения значений PIC по поколениям позволил выявить тенденцию в изменении этого показателя в спектрах 8-ми из 11-ти праймеров (Табл.2). Достоверным оказалось увеличение значения PIC в поколении F2 относительно поколения F0 для спектров ампликонов праймеров (AC)9G, (AGC)6G, (AGC)6C, (ACC)6C, а в поколении F2 по отношению к F1 – соответственно для праймеров (CT)9G, (CTC)6C, (CTC)6A и GT(CAC)7 (Табл. 2). Не отмечено достоверных изменений этого показателя в поколениях для спектров ампликонов, полученных с применением 3-х праймеров – (GA)9C, (CAC)7A и (CAC)7T. В сумме же по усредненным значениям PIC по спектрам ампликонов всех 11-ти праймеров выявлено достоверное увеличение PIC, средней гетерозиготности на локус на особь, в поколении F2 по сравнению с поколением F0 ( $P < 0,001$ ).

Таблица 2

**Динамика изменений средней гетерозиготности, оцененная по индексу полиморфного информационного содержания (PIC) в поколениях группы исследованных животных. F0 – родительское поколение, родившееся до аварии; F1 – первое поколение родившееся от родителей F0 в условиях экспериментального вивария «Новошепеличи» в условиях повышенного уровня ионизирующего облучения и F2 – потомки F1**

№	Праймер	PIC (F0)	PIC (F1)	PIC (F2)
1	(AC)9G	0,174*0,135**	0,253*0,045	0,428*0,072**
2	(GA)9C	0,333*0,066	0,222*0,095	0,310*0,061
3	(CT)9G	0,287*0,104	0,222*0,156**	0,444*0**
4	(AGC)6G	0,243*0,170*	0,310*0,098	0,538*0,109*
5	(AGC)6C	0,215*0,065**	0,236*0,047	0,457*0,079**
6	(ACC)6C	0,287*0,053*	0,202*0,013	0,525*0,105*
7	(CTC)6C	0,224*0,204	0,242*0,092*	0,571*0,228*
8	(CTC)6A	0,607*0,186	0,370*0,102*	0,571*0,095*
9	(CAC)7A	0,310*0,196	0,387*0,272	0,573*0,128
10	(CAC)7T	0,228*0,194	0,249*,053	0,356*0,116
11	GT(CAC)7	0,291*0,142	0,249*0,082***	0,499*0,096***

Примечание: \*  $P < 0,05$ , \*\*  $P < 0,01$ , \*\*\*  $P < 0,001$

Семейный анализ наследования вариантов по 162 локусам не позволил выявить новых фрагментов ДНК, фланкированных инвертированными повторами участков микросателлитов, появление которых можно было бы расценивать как мутационное событие.

Были также проанализированы различия в уровне выявляемого генетического полиморфизма в исследуемой группе с использованием отдельно ди- и тринуклеотидных



праймеров. Среди всех выявленных 134 полиморфных локусов, доля локусов, фланкированных инвертированными повторами динуклеотидных микросателлитов, оказалась существенно ниже ( $P < 0,001$ ), чем доля полиморфных локусов, фланкированных участками тринуклеотидных микросателлитов.

Увеличение уровня гетерозиготности в группах животных F1 и F2, имеющих общего отца – быка Урана, свидетельствует о предпочтительном воспроизводстве гетерозигот в условиях хронического действия низкодозового ионизирующего излучения. Следует отметить, что сходные данные по тем же группам крупного рогатого скота были получены нами ранее при их генотипировании по аллельным вариантам белков и ферментов [14].

Выполнен анализ частот встречаемости различных типов цитогенетических аномалий в мазках крови этих же групп животных. Получены следующие данные (табл. 3).

Таблица 3

**Количество двуядерных лимфоцитов (ДЛ), лимфоцитов (ЛМЯ) и эритроцитов с микроядрами (ЭМЯ) на 1000 клеток у животных черно-пестрой породы родительского поколения F<sub>0</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> экспериментального вивария “Новошепеличи”**

N, F <sub>0</sub>	ЭМЯ, %	ДЛ, %	ЛМЯ, %	N, F <sub>1</sub>	ЭМЯ, %	ДЛ, %	ЛМЯ, %	N, F <sub>2</sub>	ЭМЯ, %	ДЛ, %	ЛМЯ, %
Альфа	5	-	-	Голка 7	7	-	-	113	10	-	-
6843	7	8	4	4776	3	-	-	122	7	-	-
Гамма	6	-	-	120	5	-	-	136	7	9	3
6827	5	-	-	42	6	7	2	151	4	-	-
6824	3	8	5	105	4	-	-	152	5	7	3
6803	3	-	-	49	4	-	-	147	8	5	3
				4789	4	6	3	144	5	7	5
				116	5	-	-	154	3	-	-
				Роза 3	6	6	4	161	6	2	3
				150	4	6	1	169	6	4	2
				149	5	-	-	157	5	5	4
				167	2	-	-	158	5	3,5	1
				160	4	5	3	<b>среднее</b>	<b>5,9± 0,5</b>	<b>5,3± 1,0</b>	<b>3,0± 0,3</b>
				166	5	3	2				
				162	4	5	2				
<b>среднее</b>	<b>5,0± 1,0</b>	<b>8</b>	<b>4,5± 0,4</b>		<b>4,5± 0,3</b>	<b>5,4± 0,5</b>	<b>2,4± 0,4</b>				

Частота встречаемости лейкоцитов с микроядрами (ЛМЯ) у родительского поколения F<sub>0</sub> статистически достоверно оказалась выше, чем в поколениях F<sub>1</sub> ( $P < 0,05$ ) и F<sub>2</sub> ( $P < 0,01$ ), рожденных в зоне повышенного радионуклидного загрязнения. Что касается количества эритроцитов с микроядрами (ЭМЯ), то межгрупповые отличия по этому показателю были менее выражены. То есть, по частотам встречаемости цитогенетических аномалий в мазках периферической крови в поколениях крупного рогатого скота, родившихся в условиях повышенного ионизирующего излучения, наблюдается отчетливое повышение радиорезистентности животных. Такая же динамика наблюдалась по снижению частот встречаемости цитогенетических аномалий в клетках костного мозга в поколениях обыкновенной полевки и рыжей полевки, отловленных в разные годы в местообитаниях с высокими уровнями радионуклидного загрязнения (Чистогаловка,  $> 500$  Ки/км<sup>2</sup>; «Рыжий лес»,  $> 1000$  Ки/км<sup>2</sup>) [14].

Интересно отметить, что похожие данные о селекции устойчивых особей на фоне неблагоприятных экологических условий были получены нами у разных сельскохозяйственных видов, воспроизводящихся в условиях биосферного заповедника (Хубсугул, Монголия) и в зоне рискованного животноводства в Южной части пустыни Гоби.

Был выполнен сравнительный анализ частот встречаемости эритроцитов с микроядрами в образцах крови местных монгольских пород крупного рогатого скота, овец, а также яков, воспроизводящихся в разных эколого-географических условиях: северо-запад Монголии, район Хубсугул, биосферный заповедник; юг Монголии, район, примыкающий к пустыне Гоби – зона рискованного животноводства. Количество эритроцитов с микроядрами рассчитывали в 3000 клеток и выражали в промилях (%). Частоты встречаемости эритроцитов с микроядрами оказались близкими у разных видов, воспроизводящихся в одних и тех же экологических условиях, но существенно отличались между животными из разных эколого-географических регионов. Так, в районе биосферного заповедника с благоприятными условиями для разведения, частоты встречаемости эритроцитов с микроядрами оказались существенно выше, чем у животных тех же видов в зоне рискованного животноводства. В районе Хубсугул у овец (22 головы) частота эритроцитов с микроядрами была  $5,3 \pm 0,4$  ‰; у крупного рогатого скота (7 голов) –  $4,6 \pm 0,7$  ‰; у яков (7 голов) –  $3,2 \pm 0,6$  ‰; в пустыне Гоби у овец (10 голов) –  $0,9 \pm 0,1$  ‰; у крупного рогатого скота (7 голов) –  $1,8 \pm 0,6$  ‰; у яков (7 голов) –  $0,3 \pm 0,2$  ‰. Полученные данные свидетельствуют о том, что хроническое действие факторов экологического стресса высокой интенсивности способствует отбору животных (в ряду поколений) с повышенной устойчивостью генетического аппарата к неблагоприятным средовым условиям.

К настоящему времени накоплено большое количество данных об изменениях соотношения полов у детей, рожденных в разных странах после аварии на Чернобыльской АЭС, увеличения смертности новорожденных мужского пола [15, 16, 17]. Сходные данные были получены и нами при анализе плодовитости и смертности животных в поколениях крупного рогатого скота экспериментального вивария «Новошепеличи». Так, 16 коров родительского поколения (F<sub>0</sub>) суммарно дали 96 телят ( $0,93 \pm 0,03$  теленка на корову в год); 20 из них (21 %) умерло в возрасте до 3 месяцев после рождения. F<sub>1</sub>, первое дочернее поколение, родившееся в условиях экспериментального хозяйства «Новошепеличи», существенно отличалось от родительского по этому показателю. Так, среди 36 коров F<sub>1</sub> 21 корова (58 %) оказались стерильными; только 15 коров F<sub>1</sub> принесли потомство F<sub>2</sub> поколения ( $0,73 \pm 0,06$ ); 13 из них умерли до 3-х месячного возраста после рождения (26 %). 4 коровы F<sub>2</sub> суммарно родили 10 телят (F<sub>3</sub>) за 2–4 года;  $0,94 \pm 0,06$  теленка на корову в год. Обращает на себя внимание также тот факт, что среди 20-ти погибших телят в F<sub>1</sub> преобладали самцы (среди погибших были 6 самок и 14 самцов), а среди 13-ти погибших телят F<sub>2</sub> соотношение полов было приблизительно одинаковым (7 самок и 6 самцов) [14].

Полученные данные свидетельствуют о том, что в результате повышения уровня радионуклидного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС наблюдаются изменения в приспособленности, репродуктивном «успехе» представителей разных видов. Можно ожидать, что именно изменения в плодовитости, преимущественное воспроизводство гетерозигот, увеличение количества особей с повышенной стабильностью хромосомного аппарата и могут быть интегральными показателями действия на популяцию факторов экологического стресса. По-видимому, именно показатели плодовитости и генетической структуры потомства по сравнению с родительской популяцией могут стать основой наиболее объективной оценки не только радиологических, но и других рисков, определяющих дифференциальное воспроизводство разных генотипов в популяциях в меняющихся условиях окружающей среды.

В пользу этого предположения свидетельствуют накопленные к настоящему времени данные о повышенной смертности в популяциях людей, отселенных из небезопасного района префектуры Фукусимы по повышенному уровню ионизирующего облучения [18]. Известны повышения частот встречаемости раков щитовидной железы после аварии на Чернобыльской АЭС [19], выраженное увеличение онкологических и неонкологических заболеваний популяций человека, подвергавшихся ионизирующему воздействию после взрывов атомных бомб и авариях на атомных станциях. Так, частота различных соматических заболеваний оказалась выше у ликвидаторов, по сравнению со средними значениями у жителей Латвии. Среди заболеваний ведущее место занимали заболевания нервной, пищеварительной, кардиоваскулярной, эндокринной, респираторной, иммунной систем (отношение заболеваемости у ликвидаторов к контролю увеличивалось с 1.3 в 1986 до 10.9 в 2007) [20]. В исследованиях последствий землетрясения, повышения ионизирующего

облучения в популяциях человека после фукусимской трагедии, получены данные, свидетельствующие о том, что уже в первые несколько дней наблюдаются выраженные изменения в целом ряде показателей углеводного и липидного обмена, которые сохраняются месяцами после воздействия [21]. В течение трех лет в префектуре Фукусимы после землетрясения и повышения ионизирующего облучения существенно увеличилось количество пациентов с нейро-отоларингологическими заболеваниями, осложненными депрессиями и другими ментальными дефектами [22]. Обнаружена полицитемия у людей, эвакуированных из зоны повышенного ионизирующего облучения в течение двух лет после аварии на атомной станции Фукусимы, свидетельствующая о существенных изменениях в кроветворении [23]. Очевидно, что все перечисленные последствия для здоровья населения могут быть непосредственно связаны с понижением репродуктивного «успеха». Можно ожидать, что именно этим снижением и обусловлено наблюдаемое противоречие между множественными неблагоприятными последствиями для здоровья у родительского поколения повышения ионизирующего облучения и отсутствием таких выраженных последствий у рожденных ими детей [7–9]. По-видимому, и в популяциях человека реализуется правило, описанное еще И.И. Шмальгаузенем, о том, что при изменении экологических условий преимущества для воспроизводства получают особи, обладающие широкой неспецифической устойчивостью к неблагоприятным воздействиям [24]. С накопленными к настоящему времени наблюдениями хорошо согласуются сформулированные нами положения о последствиях техногенных катастроф, которые были обозначены как «законы Чернобыля». Эти законы следующие: 1) после Чернобыля, рождаются не все, кто должен был бы родиться; 2) после Чернобыля идет отбор против специализированных форм и преимущественное воспроизводство менее специализированных, но обладающих более высокой устойчивостью к действию неблагоприятных средовых факторов; 3) ответ на одни и те же дозы ионизирующего облучения зависит от ее «новизны» для конкретной популяции, т.е. наличия предшествующего отбора у предковых поколений на устойчивость к таким дозам; 4) все проблемы Чернобыля впереди, поскольку поколение, попавшее под прямое повреждающее воздействие аварии относительно недавно вступило в репродуктивный период [25].

#### **Примечания:**

1. Mousseau T.A., Nelson N., Shestopalov V. Don't underestimate the death rate from Chernobyl // *Nature*. 2005. Vol. 437. p. 1089.
2. The Lesvos Declaration. European Committee on Radiation Risk. 6th May 2009 <http://www.euradcom.org/2009/lesvosdeclaration.htm>
3. Scott B.R. It's time for a new low-dose-radiation risk assessment paradigm — one that acknowledges hormesis // *Dose-Response*. 2008. Vol. 6. pp. 333–351.
4. Бурлакова Е.Б., Голощапов А.Н., Горбунова Н.В. и др. Особенности биологического действия «малых» доз облучения // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1996. Т. 36. № 4. С. 610–631.
5. Hasegawa A, Tanigawa K, Ohtsuru A, Yabe H, Maeda M, Shigemura J, Ohira T, Tominaga T, Akashi M, Hirohashi N, Ishikawa T, Kamiya K, Shibuya K, Yamashita S, Chhem RK. Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima // *Lancet*. 2015;386(9992):479–88. doi: 10.1016/S0140-6736(15)61106-0.
6. Kamiya K, Ozasa K, Akiba S, Niwa O, Kodama K, Takamura N, Zaharieva EK, Kimura Y, Wakeford R. Long-term effects of radiation exposure on health // *Lancet* 2015; 386: 469–478.
7. Kodaira M, Ryo H, Kamada N, et al. No evidence of increased mutation rates at microsatellite loci in off spring of A-bomb survivors. // *Radiat Res* 2010; 173: 205–13.
8. Izumi S, Koyama K, Soda M, Suyama A. Cancer incidence in children and young adults did not increase relative to parental exposure to atomic bombs // *Br J Cancer* 2003; 89: 1709–13.
9. Tatsukawa Y, Cologne JB, Hsu W-L, et al. Radiation risk of individual multifactorial diseases in offspring of the atomic-bomb survivors: a clinical health study // *J Radiol Prot* 2013; 33: 281–93.
10. Sperling K, Pelz J, Wegner RD, Doerries A, Grueters A, Mikkelsen M. 1994. Significant increase in trisomy 21 in Berlin nine months after the Chernobyl reactor accident: temporal correlation or causal relation? // *BMJ* 309(6948): 158–162.

11. Zatsepin I, Verger P, Robert-Gnansia E, Gagniere B, Khmel Z, Lazjuk G. 2004. Cluster of Down's syndrome cases registered in January 1987 in the Republic of Belarus as a possible effect of the Chernobyl accident // *International Journal of Radiation Medicine* 6(1–4): 57–71.
12. Лягинская А. М., Туков А. Р., Осипов В. А. и др. Врожденные пороки развития у потомства ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2009. Том 49. №6. С. 694–702.
13. Чижевський І.В. Оцінка параметрів переходу  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  до організму та продукції великої рогатої худоби при пасовищному утриманні тварин (на прикладі зони відчуження Чорнобильської АЕС). Автореф. дис. канд. біол. наук: Київ. нац. ун-т ім. Т.Шевченка. К., 2004. 20 с.
14. Глазко Т.Т., Архипов Н.П., Глазко В.И. Популяционно-генетические последствия экологических катастроф на примере Чернобыльской аварии. М: ФГОУ ВПО РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2008. 556 с.
15. Peterka M, Peterkova R, Likovsky Z. 2004. Chernobyl: prenatal loss of four hundred male fetuses in the Czech Republic // *Reproductive Toxicology* 18: 75–79.
16. Scherb H., Voigt R. Analytical ecological epidemiology: exposure–response relations in spatially stratified time series // *Environmetrics* 2009; 20: 596–606.
17. Scherb H., Weigelt E. Congenital Malformation and Stillbirth in Germany and Europe Before and After the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident // *ESPR – Environ Sci and Pollut Res. Special Issue 1* (2003): 117–125.
18. Tanaka R. Prolonged Living as a Refugee from the Area Around a Stricken Nuclear Power Plant Increases the Risk of Death // *Prehosp Disaster Med.* 2015;30(4):425-30.
19. Little MP, Kwon D, Zablotska LB, Brenner AV, Cahoon EK, Rozhko AV, et al. Impact of Uncertainties in Exposure Assessment on Thyroid Cancer Risk among Persons in Belarus Exposed as Children or Adolescents Due to the Chernobyl Accident // *PLoS ONE*. 2015. 10(10): e0139826. (doi:10.1371/journal.pone.0139826).
20. Eglite ME, Zvagule TJ, Rainsford KD, Reste JD, Curbakova EV, Kurjane NN. Clinical aspects of the health disturbances in Chernobyl Nuclear Power Plant accident clean-up workers (liquidators) from Latvia // *Inflammopharmacology*. 2009;17(3):163-9.
21. Tsubokura M., Takita M., Matsumura T., Hara K., Tanimoto T., Kobayashi R., Hamaki T., Oiso G., Kami M., Okawada T., Tachiya T. Changes in metabolic profiles after the Great East Japan Earthquake: a retrospective observational study // *BMC Public Health – 2013* 13:267. (doi:10.1186/1471-2458-13-267)
22. Hasegawa J, Hidaka H, Kuriyama S, Obara T, Hashimoto K, Tateda Y, et al. Change in and Long-Term Investigation of Neuro-Otologic Disorders in Disaster-Stricken Fukushima Prefecture: Retrospective Cohort Study before and after the Great East Japan Earthquake.// *PLoS ONE*. 2015. 10(4): e0122631. (doi:10.1371/journal.pone.0122631).
23. Sakai A., Ohira T., Hosoya M., Ohtsuru A., Satoh H., Kawasaki Y., Suzuki H., Takahashi A., Kobashi G., Ozasa K., Yasumura S., Yamashita S., Kamiya K., Abe M. Life as an evacuee after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident is a cause of polycythemia: the Fukushima Health Management Survey // *BMC Public Health*. 2014; 14:1318. (doi:10.1186/1471-2458-14-1318)
24. Шмальгаузен И.И. Факторы эволюции. Теория стабилизирующего отбора. 2-е изд. М.: Наука, 1968. 451 с.
25. Glazko VI, Glazko TT. Laws of anthropogenic (ecological) disasters – the example of the Chernobyl accident.// *Biotechnol. & Biotechnol.* 2011. Vol. 25, N 4. pp. 1–6 DOI: 10.5504/bbeq.2011.0088.

### References:

1. Mousseau T.A., Nelson N., Shestopalov V. Don't underestimate the death rate from Chernobyl // *Nature*. 2005. Vol. 437. p. 1089.
2. The Lesvos Declaration. European Committee on Radiation Risk. 6th May 2009 <http://www.euradcom.org/2009/lesvosdeclaration.htm>
3. Scott B.R. It's time for a new low-dose-radiation risk assessment paradigm – one that acknowledges hormesis// *Dose-Response*. 2008. Vol. 6. pp. 333–351.
4. Burlakova EB Goloshchapov AN Gorbunov, NV et al. Features of the biological effect of "small" doses of radiation // *Radiation Biology. Radioecology*. 1996. V. 36. № 4. pp. 610–631.

5. Hasegawa A, Tanigawa K, Ohtsuru A, Yabe H, Maeda M, Shigemura J, Ohira T, Tominaga T, Akashi M, Hirohashi N, Ishikawa T, Kamiya K, Shibuya K, Yamashita S, Chhem RK. Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima // *Lancet*. 2015;386(9992):479-88. doi: 10.1016/S0140-6736(15)61106-0.
6. Kamiya K, Ozasa K, Akiba S, Niwa O, Kodama K, Takamura N, Zaharieva EK, Kimura Y, Wakeford R. Long-term effects of radiation exposure on health//*Lancet* 2015; 386: 469–478.
7. Kodaira M, Ryo H, Kamada N, et al. No evidence of increased mutation rates at microsatellite loci in off spring of A-bomb survivors.// *Radiat Res* 2010; 173: 205–13.
8. Izumi S, Koyama K, Soda M, Suyama A. Cancer incidence in children and young adults did not increase relative to parental exposure to atomic bombs // *Br J Cancer* 2003; 89: 1709–13.
9. Tatsukawa Y, Cologne JB, Hsu W-L, et al. Radiation risk of individual multifactorial diseases in offspring of the atomic-bomb survivors: a clinical health study // *J Radiol Prot* 2013; 33: 281–93.
10. Sperling K, Pelz J, Wegner RD, Doerrries A, Grueters A, Mikkelsen M. 1994. Significant increase in trisomy 21 in Berlin nine months after the Chernobyl reactor accident: temporal correlation or causal relation? // *BMJ* 309(6948): 158–162.
11. Zatspein I, Verger P, Robert-Gnansia E, Gagniere B, Khmel Z, Lazjuk G. 2004. Cluster of Down's syndrome cases registered in January 1987 in the Republic of Belarus as a possible effect of the Chernobyl accident // *International Journal of Radiation Medicine* 6(1–4): 57–71.
12. Lyaginskaya AM, Tukov AN Osipov VA et al. Congenital malformations in the offspring of liquidators of the Chernobyl // *Radiation Biology. Radioecology*. 2009. Vol. 49. №6. pp. 694–702.
13. Chizhevsky IV Evaluation of the conversion options <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in an organism and production of cattle at pasture animals (on the example of the exclusion zone of the Chernobyl NPP). Author. Thesis. candidate. Biol. Sciences Kyiv. nat. University of them. Shevchenko. K., 2004. 20 p.
14. Glazko TT, NP Arkhipov, VI Glazko Population-genetic consequences of environmental disasters on the example of the Chernobyl accident. M: RGAU – ICCA named after KA Timiryazev, 2008. 556 p.
15. Peterka M, Peterkova R, Likovsky Z. 2004. Chernobyl: prenatal loss of four hundred male fetuses in the Czech Republic // *Reproductive Toxicology* 18: 75–79.
16. Scherb H., Voigt R. Analytical ecological epidemiology: exposure–response relations in spatially stratified time series // *Environmetrics* 2009; 20: 596–606.
17. Scherb H., Weigelt E. Congenital Malformation and Stillbirth in Germany and Europe Before and After the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident // *ESPR – Environ Sci and Pollut Res. Special Issue 1* (2003): 117–125.
18. Tanaka R. Prolonged Living as a Refugee from the Area Around a Stricken Nuclear Power Plant Increases the Risk of Death // *Prehosp Disaster Med*. 2015;30(4):425-30.
19. Little MP, Kwon D, Zablotska LB, Brenner AV, Cahoon EK, Rozhko AV, et al. Impact of Uncertainties in Exposure Assessment on Thyroid Cancer Risk among Persons in Belarus Exposed as Children or Adolescents Due to the Chernobyl Accident // *PLoS ONE*. 2015. 10(10): e0139826. (doi:10.1371/journal.pone.0139826).
20. Eglite ME, Zvagule TJ, Rainsford KD, Reste JD, Curbakova EV, Kurjane NN. Clinical aspects of the health disturbances in Chernobyl Nuclear Power Plant accident clean-up workers (liquidators) from Latvia // *Inflammopharmacology*. 2009;17(3):163-9.
21. Tsubokura M., Takita M., Matsumura T., Hara K., Tanimoto T., Kobayashi R., Hamaki T., Oiso G., Kami M., Okawada T., Tachiya T. Changes in metabolic profiles after the Great East Japan Earthquake: a retrospective observational study // *BMC Public Health – 2013* 13:267. (doi:10.1186/1471-2458-13-267)
22. Hasegawa J, Hidaka H, Kuriyama S, Obara T, Hashimoto K, Tateda Y, et al. Change in and Long-Term Investigation of Neuro-Otologic Disorders in Disaster-Stricken Fukushima Prefecture: Retrospective Cohort Study before and after the Great East Japan Earthquake.// *PLoS ONE*. 2015. 10(4): e0122631. (doi:10.1371/journal.pone.0122631).
23. Sakai A., Ohira T., Hosoya M., Ohtsuru A., Satoh H., Kawasaki Y., Suzuki H., Takahashi A., Kobashi G., Ozasa K., Yasumura S., Yamashita S., Kamiya K., Abe M. Life as an evacuee after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident is a cause of polycythemia: the Fukushima Health Management Survey // *BMC Public Health*. 2014; 14:1318. (doi:10.1186/1471-2458-14-1318)

24. Shmal'gauzen I Factors of evolution. The theory of stabilizing selection. 2nd ed. M.: Nauka, 1968. 451 p.

25. Glazko VI, Glazko TT. Laws of anthropogenic (ecological) disasters – the example of the Chernobyl accident.// Biotechnol. & Biotechnol. 2011. Vol. 25, N 4. pp. 1–6. DOI: 10.5504/bbeq.2011.0088.

УДК 575.82

### **Репродуктивный «успех» и популяционно-генетические последствия экологических стрессов на примере аварий в Чернобыле и Фукусиме**

<sup>1</sup> Валерий Иванович Глазко

<sup>2</sup> Татьяна Теодоровна Глазко

<sup>1-2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская академия наук

<sup>1-2</sup> Центр экспериментальной эмбриологии и репродуктивных биотехнологий, Российская академия наук

<sup>1</sup> Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН (иностраный член)

E-mail: vglazko@yahoo.com

<sup>2</sup> Доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник

E-mail: tglazko@rambler.ru

**Аннотация.** Выполнен анализ наследования ISSR-PCR маркеров, частот встречаемости цитогенетических аномалий в двух поколениях (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>) крупного рогатого скота, рожденных в экспериментальном виварии «Новошепеличи» в условиях высокого уровня ионизирующего облучения в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Генотипирование выполняли с использованием в качестве праймеров в полимеразной цепной реакции фрагментов 5-ти динуклеотидных и 6-ти тринуклеотидных микросателлитных локусов, суммарно по 162 геномным фрагментам ДНК, фланкированным инвертированными повторами микросателлитов. В среднем доля полиморфных локусов, полиморфное информационное содержание (PIC) спектров продуктов амплификации не уменьшались в двух поколениях потомков по сравнению с материнским поколением (F<sub>0</sub>), не смотря на общего для всех животных быка-производителя (F<sub>0</sub>). По усредненным значениям PIC по спектрам ампликонов всех 11-ти праймеров выявлено достоверное увеличение PIC на локус на особь, в поколении F<sub>2</sub> по сравнению с поколением F<sub>0</sub> (P < 0,001). Наблюдается в поколениях уменьшение частот встречаемости цитогенетических аномалий в клетках крови, соответствующее выявленным у разных видов, воспроизводящихся в ряду поколений в условиях хронического действия неблагоприятных факторов экологического стресса (зоны «рискованного» животноводства Южного Гоби – крупный рогатый скот, овцы, яки; высокий уровень радионуклидного загрязнения – виды полевков). Полученные данные свидетельствуют о том, что такие условия способствуют предпочтительному воспроизводству гетерозигот в полилокусных спектрах ДНК маркеров, а также животных с относительно повышенной стабильностью хромосомного аппарата. Обсуждается перспективность использования репродуктивного «успеха» носителей этих характеристик в качестве интегрального показателя селективного действия факторов экологического стресса.

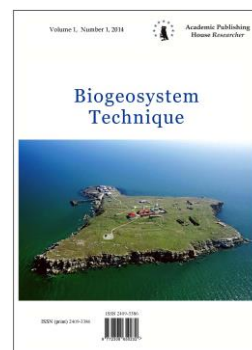
**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, ISSR-PCR маркеры, цитогенетические аномалии, репродуктивный «успех», экологический стресс.

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation  
Biogeosystem Technique  
Has been issued since 2014.  
ISSN: 2409-3386  
E-ISSN: 2413-7316  
Vol. 6, Is. 4, pp. 327-344, 2015

DOI: 10.13187/bgt.2015.6.327  
[www.ejournal19.com](http://www.ejournal19.com)



## Articles and Statements

UDC 544.582 546.73 631.412 633.16

### The Influence of Soil Physical and Chemical Characteristics on Bioavailability of $^{60}\text{Co}$

<sup>1</sup> Vyacheslav S. Anisimov  
<sup>2</sup> Dmitry V. Dikarev  
<sup>3</sup> Lidia N. Anisimova  
<sup>4</sup> Yury N. Korneev  
<sup>5</sup> Ilja V. Kochetkov

<sup>1-5</sup> Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Russian Federation  
Kievskoe shosse, 109 km, Obninsk, Kaluzhskaya oblast', 249032

<sup>1</sup> PhD (Biology), Head of Laboratory

E-mail: vsanisimov@list.ru

<sup>2</sup> Researcher

<sup>3</sup> PhD (Biology), researcher

E-mail: lanisimovan@list.ru

<sup>4</sup> Researcher

E-mail: yunkorneev@mail.com

<sup>5</sup> PhD (Biology), senior researcher

E-mail: ikochetkoff@gmail.com

#### Abstract

Based on the study of the relationships between the physico-chemical characteristics of different mineral soils that have previously spiked with the same amounts of  $^{60}\text{Co}$ , and the uptake of this radionuclide in the above-ground parts of test plants, there were estimated the abilities of the soils to limit the mobility of the radionuclide in the soil – plant system (soils inactivating abilities – SIA). To evaluate the latter in relation to  $^{60}\text{Co}$ , the model vegetation pot experiment was carried out in controlled conditions, using as test plant barley (*Hordeum vulgare* L.). With the aim of providing a wide range of variation of the studied physico-chemical parameters, there were selected soil samples from arable and humus-accumulative horizons of the 16 types, species and varieties of soils belonging to different climatic zones of the European part of the Russian Federation in the quantities sufficient for the determination of physical and chemical characteristics of the soils and for the vegetation experiment conducting. Based on the obtained experimental results the effect of each of the selected indicators of soil condition on the radionuclide uptake by test plants was determined. To do this, the methods of principal components and multiple regression analysis were used. At first, the independent variables (physical and chemical indicators of soil condition), which, as supposed, rendered the influence on the uptake of  $^{60}\text{Co}$  by plants were selected with use the principal components method. Further, on

the basis of private correlation coefficients, calculated using the linear regression model, the contribution of soil characteristics in SIA was estimated and their ranking was produced. Directly the values of the SIA in relation to the investigated radionuclide, expressed in scores, for each soil were calculated as the sum of products of contributions corresponding soil characteristics in the variation of resultant (concentration ratio – CR  $^{60}\text{Co}$ ) on a dimensionless quantity, equal to the difference between the specific and minimum values of the soil characteristics (variables) in the sampling to the scale of variation of the relevant variables in the sampling.

**Key words:**  $^{60}\text{Co}$ , natural cobalt, soil, physico-chemical characteristics, barley, factor accumulation, speciation, factor analysis, regression, inactivating the ability.

### Введение

Вопросы, связанные с влиянием почвенных свойств на миграционную способность радионуклидов и тяжелых металлов в сопредельные среды и в растительно-животные компоненты экосистем имеют важное практическое значение (особенно применительно к агроэкосистемам – источникам продовольствия и промышленного сырья для человека). Соответственно, поиск наиболее значимых физико-химических характеристик почв, оказывающих влияние на миграцию вышеуказанных поллютантов в системе почва – растение с целью совершенствования прогностических моделей их поведения в агроэкосистемах является актуальной проблемой современной радио- и агроэкологии.

Для системы почва – растение характерны те же виды устойчивости, что и для экосистемы в целом: упругая и неупругая. С точки зрения последней, устойчивость к воздействию загрязняющих веществ (ЗВ) определяется, в частности, способностью почв инактивировать поллютанты. Под этим термином в рамках данной работы подразумевается снижение подвижности ЗВ в системе почва – почвенный раствор – растение. Повышение миграционной способности поллютантов является симптомом экологического неблагополучия, обусловленного переходом почв в неустойчивое состояние. Таким образом, проблема устойчивости почв является одной из фундаментальных проблем современного естествознания.

Целью работы являлась оценка инактивирующей способности почв как важнейшего фактора их эколого-геохимической устойчивости по отношению к «природному» Со и радиологически значимому долгоживущему радионуклиду  $^{60}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 5,272$  года,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучатель с максимальной энергией  $\beta$ -излучения 1,33 МэВ), представляющему радиологическую опасность в местах расположения ядерных объектов, и разработка методических подходов для оценки влияния эдафических факторов на подвижность  $^{60}\text{Co}$  в системе почва – растение.

### Материалы и методы

Была составлена представительная выборка (из 16 типов, видов, разновидностей почв, относящихся к разным климатическим зонам европейской части РФ), обеспечив тем самым широкий диапазон варьирования изучаемых физико-химических показателей, и проведены модельные вегетационные опыты с внесением  $^{60}\text{Co}$ .

Для экспериментальных исследований были отобраны образцы из пахотных горизонтов следующих почв: дерново-подзолистая среднесуглинистая, Калужская обл., Боровский р-н, д. Кривское – П<sup>д</sup>(К); дерново-подзолистая супесчаная, Калужская обл., Жуковский р-н, д. Передоль – П<sup>д</sup>(П); дерново-подзолистая среднесуглинистая, Калужская обл., Жуковский р-н, с. Тарутино – П<sup>д</sup>(Т); дерново-подзолистая тяжелосуглинистая, Калужская обл., Малоярославецкий р-н, с. Недельное – П<sup>д</sup>(Н); дерново-подзолистая среднесуглинистая, Калужская обл., городской округ г. Калуга, д. Жерело – П<sup>д</sup>(Ж); чернозем выщелоченный, г. Курск – Ч<sup>в</sup>(К); чернозем оподзоленный, Тульская обл., г. Ефремов – Ч<sup>о</sup>(Еф); светло-серая лесная почва, Калужский р-н, Калужская обл., д. Дронино – Л<sup>св</sup>(Д); серая лесная почва, Калужская обл., Воротынский р-н, п. Опытное поле – Л<sup>с</sup>(В); чернозем выщелоченный, окрестности г. Ельца Липецкой области – Ч<sup>в</sup>(Ел); чернозем типичный, окрестности г. Воронежа – Ч<sup>т</sup>(В); чернозем типичный, Воронежская обл., с. Рогачевка – Ч<sup>т</sup>(Р); чернозем обыкновенный, окрестности г. Ставрополя – Ч<sup>о</sup>(Ст); чернозем южный, Ставропольский край, Андроповский р-н, с. Дубовая Балка – Ч<sup>ю</sup>(А); чернозем выщелоченный, Ставропольский край, ст. Ессентукская – Ч<sup>в</sup>(Ес); дерново-карбонатная,



Ставропольский край, гора Б. Седло, окрестности г. Кисловодска – ДК(Ки), (гумусово-аккумулятивный горизонт).

Исследование проводилось на основе модельного вегетационного опыта, который предусматривал выращивание в контролируемых условиях двухнедельных растений ячменя сорта Зазерский-85 на почвах, искусственно загрязненных  $^{60}\text{Co}$ . Уровни загрязнения выбирались с учетом возможностей используемых аналитических методов и надежного измерения радионуклидов в ограниченной биомассе 14-суточных растений. Условия проведения модельного опыта были следующими:

- предварительная подготовка почв к эксперименту включала доведение их до воздушно-сухого состояния, просеивание через сито с диаметром отверстий 2 мм и определение исходных физико-химических характеристик;

- в различные почвы (всего 16 типов, видов и разновидностей) было внесено одинаковое количество радиоизотопа  $^{60}\text{Co}$  (в пересчете на дату внесения – 150 кБк/кг). Для этого в просеянную через сито 2 мм воздушно-сухую почву, добавляли деионизированную воду влажности, соответствующей полной влагоемкости (ПВ), после чего в почву вносили растворы  $^{60}\text{CoCl}_2$  с расчетной активностью при тщательном перемешивании образовавшейся суспензии. Общая масса почвенной суспензии затем подразделялась на части соответственно числу повторностей опыта, которые помещались в полиэтиленовые вегетационные сосуды. Сосуды с почвой выдерживали при комнатной температуре в течение месяца, в этот период дважды увлажняли дистиллированной водой до 60 % ПВ и подсушивали. Затем образцы почвы еще раз разминали, просеивали через 2 мм сито и отбирали из них пробы для радиометрического анализа. Равномерность распределения  $^{60}\text{Co}$  оценивали по результатам  $\gamma$ -спектрометрического анализа образцов почв, подготовленных для разных вариантов опыта. Подготовленные таким образом почвы в дальнейшем использовались для выращивания ячменя;

- в вегетационные сосуды было высеяно одинаковое количество семян тест-культуры – ячменя (*Hordeum vulgare* L.). Перед посевом ячменя почвы увлажняли дистиллированной водой до 60 % от ПВ и высевали семена в количестве 15 штук на сосуд, содержащий 500 г воздушно-сухой почвы. Семена предварительно проращивались в течение двух дней на фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой.

- растения выращивали в течение одинакового периода времени (14 дней) в одинаковых условиях (температура 18-20°C, постоянная влажность почвы 60 % ПВ, освещенность 7000 Лк). Влажность контролировалась ежедневным взвешиванием сосудов. Полив проводили таким образом, чтобы избежать загрязнения растений почвенными частицами в результате разбрызгивания. Размещение поддонов с вегетационными сосудами меняли ежедневно по определенной схеме, чтобы обеспечить более равномерную освещенность растений. На пятнадцатые сутки растения срезали на высоте 0,5 см от поверхности почвы. При уборке регистрировались сырая, воздушно-сухая и абсолютно-сухая (после высушивания растительного материала при 105°C в течение шести часов) массы. В подготовленном к анализу растительном материале определяли удельную активность  $^{60}\text{Co}$  (в расчете на абсолютно-сухую массу). Повторность опытов трехкратная. Удельную активность  $^{60}\text{Co}$  определяли гамма-спектрометрическим методом (спектрометр ГАММА-1П с полупроводниковым детектором из особо чистого германия с относительной эффективностью регистрации 35 %).

Биологическую доступность стабильных «природного» Co, представляющему собой совокупность 2-х стабильных изотопов -  $^{57}\text{Co}$  и  $^{59}\text{Co}$ , и радионуклида  $^{60}\text{Co}$  определяли с помощью коэффициентов накопления (*КН*) – отношения концентрации (удельной активности) металла в абсолютно-сухом растительном материале к его концентрации (удельной активности) в абсолютно-сухой почве.

Физико-химические показатели состояния почв, содержание подвижных, кислоторастворимых форм элементов (табл. 1, 2), определялись общепринятыми методами [1, 2, 3]: рН<sub>сол.</sub>; содержание фракции физической глины (< 0,01 мм, %); железо подвижное (вытяжка Тамма); Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub>подв., К<sub>2</sub>О (для всех почв, включая дерново-подзолистые, – по Чирикову); содержание подвижных форм Co в почвах; содержание гумуса (по методу Тюрина); состав гумуса в щелочных вытяжках из минеральных почв по методу Кононовой – Бельчиковой, соотношение алифатических и ароматических частей органических молекул

( $E_4/E_6$ ) в гуматах, полученных из щелочных вытяжек из минеральных почв [3, 4]. Содержание кислоторастворимого (потенциально доступного растениям) и валового Со в почве определяли в соответствии [5, 6]. Концентрацию Fe, Со в почвенных вытяжках определяли после соответствующей пробоподготовки оптическим эмиссионным методом (ИСП-ОЭ спектрометр Liberty II фирмы Varian) [5, 7].

Таблица 1

## Показатели, характеризующие химические и физические свойства почв

Шифр пробы	Сорг. в почве, %	СЕС, (смоль /kg)	К <sub>2</sub> O подв., мг/кг	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> подв., мг/кг	CaCO <sub>3</sub> , %	Fe <sub>подв.</sub> , мг/кг	pH(KCl)	C(ГК)/C(ФК)	E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>	Фракция <0,01мм, %
Ч <sup>о</sup> (Еф)	3,92±0,02	40,2±0,7	99,9±5,2	57±1	0,28±0,02	1435±131	5,03±0,01	2,05	4,17±0,00	62,3
Ч <sup>в</sup> (Ел)	3,94±0,03	38,4±2,5	127±1	325±74	0,68±0,02	2250±93	6,80±0,01	1,67	3,64±0,01	59,8
ДК(Ки)	5,65±0,06	69,6±9,6	230±8	103±13	5,00±0,13	2990±75	7,02±0,01	0,86	4,45±0,02	51,8
Ч <sup>о</sup> (Ст)	3,32±0,02	38,1±2,6	152±1	109±3	6,79±0,63	2558±13	7,16±0,01	1,58	4,23±0,01	60,9
Ч <sup>ю</sup> (А)	2,39±0,05	34,6±4,8	167±1	121±5	0,51±0,03	5973±45	7,27±0,01	1,43	3,74±0,02	81,6
Ч <sup>в</sup> (Ес)	4,34±0,02	41,4±1,4	279±5	139±6	0,39±0,05	2120±95	6,42±0,02	1,42	3,72±0,02	80,7
Ч <sup>т</sup> (В)	4,29±0,04	47,3±0,1	155±1	202±21	0,14±0,01	2296±119	5,56±0,02	1,84	3,64±0,00	75,5
Ч <sup>в</sup> (К)	2,98±0,11	41,2±0,2	91,9±12,3	164±4	0,13±0,05	621±5	6,01±0,10	0,81	3,66±0,02	48,1
Ч <sup>т</sup> (Р)	4,29±0,07	47,2±1,0	158±2	233±4	0,18±0,04	1731±65	6,05±0,05	3,60	3,62±0,02	72,5
Л <sup>с</sup> (В)	1,65±0,02	15,2±0,9	87±2	165±27	0,32±0,02	1840±33	7,55±0,01	1,24	3,82±0,09	36,6
П <sup>д</sup> (К)	0,77±0,02	10,1±0,2	77,5±5	59±1	0,12±0,02	2618±268	5,97±0,01	0,36	3,99±0,01	42,2
П <sup>д</sup> (Ж)	2,89±0,05	10,3±0,5	60,6±3,4	29±1	0,08±0,11	3322±28	4,77±0,01	0,46	4,93±0,15	34,5
П <sup>д</sup> (Т)	1,16±0,01	12,6±1,4	53,7±0,8	244±4	0,10±0,02	2608±230	5,19±0,05	0,71	5,14±0,01	38,9
Л <sup>св</sup> (Д)	2,19±0,19	19,8±1,9	93,4±3,3	199±23	0,18±0,03	6635±472	5,66±0,01	0,99	4,71±0,27	37,9
П <sup>д</sup> (Н)	1,18±0,06	18,1±2,3	109±12	473±13	0,31±0,00	2495±7	5,90±0,01	0,55	4,30±0,20	47,2
П <sup>д</sup> (П)	0,85±0,02	6,8±0,3	74,1±1,7	97±3	0,08±0,02	1543±156	5,74±0,06	0,63	4,70±0,11	18,4

Математическая обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью программ MS Excel и Statistica 6.

### Результаты и их обсуждение

**Определение вклада физико-химических характеристик в регулирование подвижности <sup>60</sup>Со в системе почва – растение.** Существует достаточно много работ, посвященных поиску и ранжированию по степени значимости почвенных характеристик, отвечающих за транслокацию радионуклидов и ТМ в растения. В этой связи можно упомянуть известные исследования [8-10] и др. Однако, как признают и сами авторы, предлагаемый ими перечень основных показателей состояния почв, их вклад в миграционную способность ТМ в системе «почва – растение» (представленный в виде взвешивающих коэффициентов) не является исчерпывающим и требует серьезной доработки.

Особенно интересным, на наш взгляд, является метод оценки инактивирующей способности почв в отношении миграционной способности ТМ в системе «почва –

растение», предложенный В.Б. Ильиным [8]. В основе его лежат принципы, заложенные Г.Я. Ринькисом в разработанной им системе оптимизации минерального питания растений [12]. С целью оценки вклада различных почвенных свойств в формирование буферной способности почв в отношении тяжелых металлов В.Б. Ильиным были творчески использованы результаты классических работ в области агрохимии микроэлементов, проведенных Г.Я. Ринькисом с сотрудниками [12]. Конкретно, В.Б. Ильиным с сотрудниками были отобраны данные об инактивирующем влиянии на тяжелые металлы (Zn, Cd, Pb, Cu, Co) гумуса, физической глины, полугорных оксидов, карбонатов и реакции среды. На базе их была разработана шкала буферности. При этом было сделано допущение, что выявленные в опытах количественные закономерности для перечисленных выше химических элементов распространяются на остальные ТМ, относящиеся к группе металлов, повышающих свою подвижность в кислой среде. В.Б. Ильин произвел ранжирование вышеуказанных показателей в соответствии с предложенной им шкалой буферности и рассчитал их вклад (в баллах) в формирование буферности почв в отношении ТМ с применением специальных поправочных коэффициентов относительно содержания гумуса.

В.Б. Ильин [8] отмечал, что такая информация имеет прямое отношение к экологическому мониторингу и нормированию, поскольку многие из микроэлементов, накапливаясь в почве в избыточном количестве, становятся токсичными для живых организмов и известны как «тяжелые металлы».

В настоящем исследовании мы попытались, применив подходы Ильина – Ринькиса, но, исходя из природного разнообразия физико-химических свойств разных типов и видов некарбонатных и карбонатных почв Европейской части России, установить количественные связи между показателями, отражающими физико-химические свойства почв и, показателем, характеризующим биологическую доступность  $^{60}\text{Co}$  (коэффициентом накопления – КН) с использованием тест-культуры ячменя.

В радиозоологии основополагающей является концепция утверждающая прямо пропорциональную зависимость между удельной активностью радионуклидов в растениях ( $A_{\text{раст.}}$ ) и в почве ( $A_{\text{почва}}$ ) в очень широком диапазоне уровней радиоактивного загрязнения [13, 14, 15]:

$$A_{\text{раст.}} = KH \times A_{\text{почва}} \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $KH$  является функцией как различных свойств почв (кислотности, дисперсности, содержания гумуса, содержания в доступных растениям формах микро- или макроколичеств изотопных и неизотопных носителей и т.д.), так и индивидуальных особенностей растений. Его принято называть «коэффициентом накопления радионуклида – (КН)». Подобное соотношение возможно ввиду чрезвычайно низких (ультрамикро- и наноконцентраций) радионуклидов в почве. В связи с вышесказанным необходимо сделать уточнение применительно к  $^{60}\text{Co}$ . Внесенный радионуклид, действительно, находится в исследуемых почвах в чрезвычайно низких концентрациях, однако, в почвах также присутствует в микроколичествах стабильный кобальт (табл. 2). Тем не менее, значительная часть стабильного кобальта в почвах зафиксирована в недоступном растениям состоянии, а потенциально доступные его количества (извлекаемые с помощью 1 М HCl вытяжки) составляют, в среднем, всего лишь около 35 % от валового количества (табл. 2).

**Удельные активности, концентрации и коэффициенты  
накопления  $^{60}\text{Co}$  ячменем (n=3)**

Шифр пробы	Со (валовый), мг/кг	Со (вытяжка 1М HCl), мг/кг	Удельная активность $^{60}\text{Co}$ , кБк/кг		КН( $^{60}\text{Co}$ )
			Почвы	Растения	
Ч <sup>о</sup> (Еф)	13,00±1,28	5,16±0,20	151,0±4,6	3,65±0,21	0,024±0,002
Ч <sup>в</sup> (Ел)	14,74±1,65	5,37±0,04	159,6±15,7	2,05±0,35	0,013±0,003
ДК(Ки)	11,92±0,82	4,57±0,14	154,0±0,7	1,40±0,14	0,009±0,001
Ч <sup>о</sup> (Ст)	13,17±0,14	5,58±0,10	150,5±7,8	2,00±0,71	0,013±0,005
Ч <sup>ю</sup> (А)	17,75±0,24	7,74±0,14	141,9±0,5	2,00±0,71	0,014±0,005
Ч <sup>в</sup> (Ес)	9,16±0,21	3,83±0,11	149,5±4,4	2,25±0,35	0,015±0,002
Ч <sup>т</sup> (В)	17,60±0,62	5,75±0,00	165,4±19,9	2,00±0,00	0,012±0,001
Ч <sup>в</sup> (К)	11,93±0,21	4,01±0,03	149,5±9,7	1,87±0,89	0,013±0,007
Ч <sup>т</sup> (Р)	14,17±0,17	5,88±0,01	151,3±5,8	1,75±0,35	0,012±0,002
Л <sup>с</sup> (В)	10,18±0,09	3,46±0,02	141,1±3,4	5,04±5,11	0,036±0,037
П <sup>д</sup> (К)	12,15±1,78	3,23±0,09	137,0±5,4	10,93±3,93	0,079±0,026
П <sup>д</sup> (Ж)	16,30±0,37	3,10±0,06	141,7±5,7	9,37±1,72	0,066±0,015
П <sup>д</sup> (Т)	16,08±0,63	3,67±0,08	140,1±1,7	12,59±11,56	0,089±0,081
Л <sup>св</sup> (Д)	13,45±0,83	5,14±0,49	140,3±11,8	4,60±2,98	0,034±0,024
П <sup>д</sup> (Н)	12,37±0,22	3,55±0,09	139,0±1,7	2,60±0,13	0,019±0,001
П <sup>д</sup> (П)	8,18±0,23	2,08±0,00	152,6±0,8	50,27±8,68	0,330±0,059

При этом, одновременное действие большого числа взаимосвязанных и независимых факторов, как на эдафическом, так и на биологическом уровнях, оказывает влияние на поглощение радионуклида. Это проявляется в виде варибельности значений КН для разных почв и видов растений. Естественно, что свойства почв и видовые особенности растений оказывают модифицирующее воздействие на значение КН. Для выяснения роли эдафических факторов в регулировании накопления  $^{60}\text{Co}$  растениями был выбран ряд показателей, характеризующих состояние почв (табл. 1). Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что разброс значений физических и химических показателей состояния, установленных с использованием общепринятых методик [1, 2, 3] для исследуемых почв весьма значителен.

При выборе показателей в расчет были приняты следующие рассуждения:

- практически все физико-химические процессы в почвах на границе раздела твердой и жидкой фаз сосредоточены в пределах фракции физической глины. Это относится и к ионам исследуемого радионуклида –  $^{60}\text{Co}$ ;

- подвижные соединения Fe и Mn, также как и органические вещества являются природным концентраторами ионов ТМ (включая исследуемый радионуклид);

- кислотность почвы обусловлена качественным и количественным соотношением присутствующих в ППК катионов  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , с одной стороны и катионов оснований, с другой стороны, характеризуется рН солевой вытяжки (или обменной кислотностью), гидролитической кислотностью;

- содержание и качественный состав органического вещества почв непосредственно связано со способностью последних ингибировать мобильность ТМ;

- содержащиеся в почвах свободные карбонаты (в основном кальция и магния), а также фосфаты традиционно считаются одним из ключевых факторов в регулировании миграционной способности ТМ и радионуклидов;

- в системе почва – растения, как в процессах сорбции-десорбции в почвах, так и корневого поглощения присутствует прямая конкуренция между внесенным в почву  $^{60}\text{Co}$  и природным кобальтом: радионуклид конкурирует с содержащимися в почвах стабильными изотопами Со за энергетически наиболее выгодные места связывания как в почвенном, так и в корневом поглощающем комплексе. Таким образом, между содержанием доступного Со

в почвах и переходом в растения  $^{60}\text{Co}$  логично предположить наличие обратно-пропорциональной зависимости. Однако, количество доступного растениям стабильного кобальта очень мало, а переход его в почвенный раствор существенно ниже, чем, например, такого микроэлемента, как Zn. В наших опытах концентрация стабильного Co в центрифужных почвенных растворах, извлеченных из нативной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (ПД(К)) после инкубации ее в течение месяца при  $W=60\%$  ПВ не превышала  $0.2\ \mu\text{M}$ , а Zn составляла  $7.0\ \mu\text{M}$ , т.е., была в 35 раз больше. Поэтому ожидать существенного вклада стабильного кобальта в миграцию его радиоактивного аналога в системе почва – растение не следует.

Тем не менее, показатель «содержание подвижного кислоторастворимого (потенциально доступного растениям) Co в почве» (табл. 2) был включен в исходную матрицу в качестве независимой переменной. К сожалению, не удалось получить достоверных данных по содержанию в почвах доступных растениям форм стабильного кобальта из-за чрезвычайно низких концентраций и высокой вариабельности его в вытяжках  $1\ \text{M}\ \text{CH}_3\text{COONH}_4$  (рН 4.8).

Поскольку присутствующие в почвах элементы питания (NPK) влияют на физиологическое состояние растений, и, соответственно, на процесс корневого поглощения Co, в перечень независимых показателей были включены содержания подвижных P и K в почвах. При этом, как было отмечено ранее, содержащиеся в почвах свободные фосфаты целесообразно рассматривать все-таки в качестве эдафического фактора, поскольку они образуют с ионами кобальта нерастворимые соединения [16]. Роль азотного питания в регулировании корневого поглощения Co сводится к вторичному эффекту «разбавления» при больших дозах азотных удобрений [17]. Поскольку в данном исследовании подобные варианты не рассматривались, содержание азота в почвах было исключено из перечня показателей, регулирующих поступление Co в растения.

Далее, с использованием показателей, характеризующих свойства почв в качестве входных переменных, была проведена параметризация регрессионных моделей, связывающих эти показатели с доступностью растениям  $^{60}\text{Co}$  для разных почв, а также произведено их ранжирование по степени вклада в инактивирующую способность почв в отношении радионуклида.

Для этого производилась многоэтапная процедура. Поскольку все определенные физико-химические показатели состояния почв (наблюдаемые, или входные переменные) измерялись в разных единицах, они были подвергнуты процедуре стандартизации. Это означает, что из значений каждой переменной по совокупности наблюдений были вычтены соответствующие средние, а полученная разность нормирована на среднеквадратичное отклонение [18, 19]. Данная процедура включена в пакеты статистической обработки данных, такие как Statistica и др. Затем, с помощью факторного анализа (метода главных компонент) количество входных переменных было редуцировано: взаимозависимые переменные были представлены в виде ортогональных факторов, представляющих собой их линейные комбинации.

Согласно выводам, полученным некоторыми авторами [20, 21, 22], лучшим критерием для определения количества выделяемых факторов при структурном анализе сложных систем является отклонение от линейного хода кривой объяснимой дисперсии, свидетельствующее об изменении вклада очередного фактора в величину объяснимой дисперсии по сравнению с величиной, соответствующей гипотезе об однородной структуре корреляционной матрицы анализируемых признаков. Часто это критерий также называют «критерием Кеттеля» или критерием «каменистой осыпи» [22].

Применение предложенного критерия к матрицам экспериментальных значений позволяет на основании формы кривой объяснимой дисперсии сделать вывод о количестве значимых факторов. С того момента, когда кривая объяснимой дисперсии перестает отклоняться от линейного хода, можно утверждать, что внутренняя структура матрицы остаточных значений исчезает, и главную роль начинают играть не общие факторы, а случайные помехи, часто называемые характерными факторами.

Применительно к полученным экспериментальным данным для начала был построен график вкладов (собственных значений) факторов в объяснимую дисперсию в виде долей от общей дисперсии всех факторов – график «каменистой осыпи» (рис. 1).

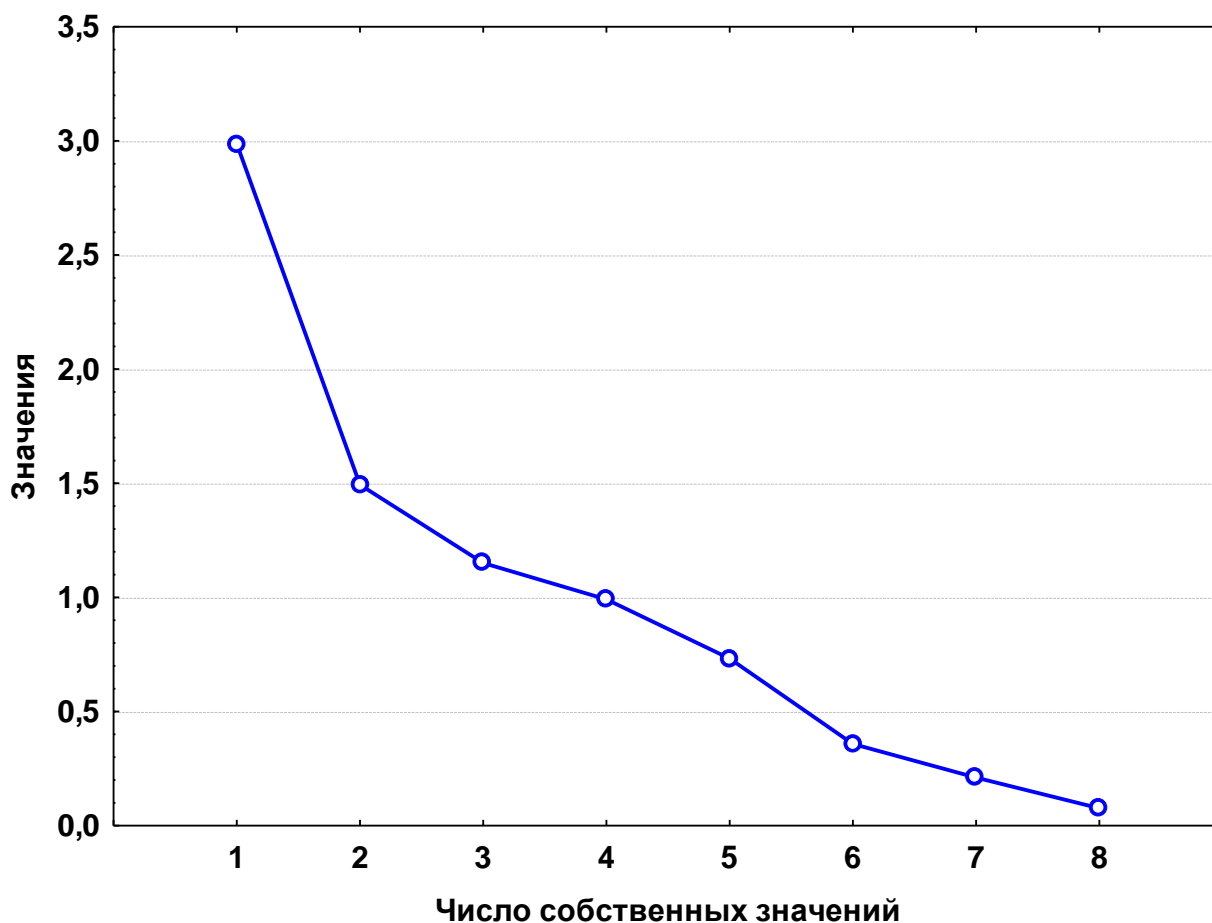


Рис. 1. График «каменистой осыпи» собственных значений всех факторов

На основании критерия «каменистой» осыпи Кэттеля были выбраны 5 факторов с собственными значениями (вкладом в общую дисперсию) превышающим 0.5. В дальнейшем использовался метод главных компонент именно для этих 5-ти факторов. Были получены собственные значения и матрица факторных нагрузок (корреляций выделенных факторов) с независимыми переменными. Матрица была подвергнута вращению на  $45^\circ$  по методу «варимакс» с целью получения более понятной или «интерпретируемой» матрицы факторных нагрузок (табл. 3).

Из таблицы 3 следует, что новая стандартизованная переменная, обозначенная как *Фактор 1* (табл. 4), сильно коррелирует с 3-мя исходными переменными: *Сорг. в почве, %*, *С ГК/С ФК* и *Фракция <0.01 мм, %* (коэффициент множественной корреляции  $R=0.98$ , коэффициент детерминации  $R^2=0.96$ ,  $F(3,12)=95.6$ ,  $p=0$ ; частный  $r^2_{Сорг} = 0.61$ ; частный  $r^2_{СГК/СФК} = 0.69$ ; частный  $r^2_{Фр<0.01} = 0.64$ ):

$$\text{Фактор1} = f(\text{Сорг.}, \text{С(ГК)/С(ФК)}, \text{Фракция } <0.01 \text{ мм}) = (0.33 \pm 0.08) \times \text{Сорг.} + (0.41 \pm 0.08) \times \text{С(ГК)/С(ФК)} + (0.39 \pm 0.08) \times \text{Фр. } <0.01 \text{ мм} \quad (2)$$

Новая переменная (обозначенная как *Фактор 2*) сильно коррелирует с 2-мя исходными переменными: *pH(KCl)* и  $E_4/E_6$  (коэффициент множественной корреляции  $R=0.93$ , коэффициент детерминации  $R^2=0.87$ ,  $F(2,13)=45.0$ ,  $p=0$ ; частный  $r^2_{\text{pH(KCl)}} = 0.75$ ; частный  $r^2_{E_4/E_6} = 0.41$ ):

$$\text{Фактор2} = f(\text{pH(KCl)}, E_4/E_6) = (0.72 \pm 0.11) \times \text{pH(KCl)} - (0.34 \pm 0.11) \times E_4/E_6 \quad (3)$$

Остальные представленные факторы (3–5) сильно коррелируют только с одной переменной каждый (соответственно, с  $P_2O_5$  подв., *Fe подв.* и  $CaCO_3$ ). В дальнейшем множественном регрессионном анализе вместо них были использованы значения самих стандартизованных переменных.

Таблица 3

**Факторные нагрузки при вращении варимакс исходных данных (жирным шрифтом отмечены нагрузки > 0,7; 18 наблюдений)**

Показатель	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
С <sub>орг.</sub> в почве, %	<b>0,81</b>	-0,04	-0,13	-0,11	0,42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> подв. мг/1000 г.п.	0,02	0,06	<b>0,99</b>	-0,02	-0,09
CaCO <sub>3</sub> , %	0,06	0,17	-0,11	0,02	<b>0,95</b>
Fe <sub>подв.</sub> , мг/кг	-0,04	-0,00	-0,02	<b>0,99</b>	0,01
pH(KCl)	0,06	<b>0,89</b>	0,06	0,10	0,39
C(ГК)/C(ФК)	<b>0,85</b>	0,08	0,10	-0,13	-0,05
E <sub>4</sub> /E <sub>6</sub>	-0,58	<b>-0,70</b>	-0,05	0,25	0,25
Фракция <0.01 мм	<b>0,87</b>	0,30	0,04	0,14	-0,01
Общ.дис.	2,49	1,41	1,03	1,11	1,32
Доля общ	0,31	0,18	0,13	0,14	0,16

В итоге, мы имеем дело с 5-ю независимыми (ортогональными) переменными, две из которых являются сложными. Таким образом, зависимая переменная КН <sup>60</sup>Со является функцией от переменных, которые можно рассматривать в качестве независимых при расчете множественной корреляции между физико-химическими показателями состояния почв и КН <sup>60</sup>Со.

Теперь, после устранения неортогональности исходных переменных (объединения взаимозависимых переменных) можно приступить к оценке влияния физико-химических свойств почв (выраженных через показатели состояния) на биологическую доступность <sup>60</sup>Со.

Суть методики заключалась в оценке вклада отдельных характеристик почвенного состояния, играющих наиболее важную роль в регулировании подвижности (и биологической доступности) радионуклидов с использованием метода пошагового множественного регрессионного анализа.

Таблица 4

**Значения факторов (новых переменных)**

Почва	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Ч <sup>0</sup> (Еф)	1,05	-1,18	-0,99	-0,74	-0,42
Ч <sup>В</sup> (Ел)	0,52	0,68	1,29	-0,33	0,07
ДК(Ки)	0,17	-0,07	-0,46	0,12	2,48
Ч <sup>0</sup> (Ст)	0,03	0,62	-0,26	-0,08	2,47
Ч <sup>Ю</sup> (А)	0,52	1,59	-0,54	2,26	-0,70
Ч <sup>В</sup> (Ес)	1,00	0,46	-0,42	-0,15	-0,29
Ч <sup>Т</sup> (В)	1,32	-0,32	0,15	-0,20	-0,55
Ч <sup>В</sup> (К)	-0,26	0,48	-0,24	-1,41	-0,51
Ч <sup>Т</sup> (Р)	1,96	-0,25	0,62	-0,61	-0,49
Л <sup>С</sup> (В)	-0,98	1,78	-0,10	-0,65	-0,33
П <sup>Д</sup> (К)	-1,12	0,73	-1,12	-0,11	-0,94
П <sup>Д</sup> (Ж)	-0,50	-1,72	-1,22	0,35	-0,14
П <sup>Д</sup> (Т)	-0,92	-1,45	0,84	0,12	-0,02
Л <sup>СВ</sup> (Д)	-0,36	-0,84	0,33	2,34	-0,22
П <sup>Д</sup> (Н)	-0,86	-0,14	2,69	-0,06	-0,11
П <sup>Д</sup> (П)	-1,57	-0,37	-0,58	-0,84	-0,30

При этом была использована линейная модель, связывающая между собой независимые и зависимую (КН  $^{60}\text{Co}$ ) переменные:

$$Y = b_0 + b_1 \times X_1 + \dots + b_n \times X_n \quad (4)$$

Результаты регрессионного анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Итоги множественного регрессионного анализа (зависимая переменная – КН  $^{60}\text{Co}$  ( $R=0.86$ ;  $R^2=0.73$ ;  $F(7,7)=2.76$ ,  $p<0.102$ ))**

Показатель	БЕТА	Станд. ош. БЕТА	B	Станд. ош. B	t(7)	p-уров.
Св.член			0,033	0,005	6,42	0,000
Со <sub>кисл.</sub> , МГ/КГ	-0,036	0,642	-0,001	0,019	-0,06	0,956
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> подв. МГ/КГ	-0,311	0,215	-0,008	0,006	-1,45	0,192
K <sub>2</sub> O <sub>подв.</sub> МГ/КГ	-0,112	0,471	-0,003	0,012	-0,24	0,818
CaCO <sub>3</sub> , %	-0,273	0,316	-0,007	0,008	-0,87	0,416
Fe, МГ/КГ	0,000	0,421	0,000	0,011	0,00	1,000
Фактор 1	-0,576	0,745	-0,016	0,021	-0,77	0,465
Фактор 2	-0,308	0,350	-0,008	0,009	-0,88	0,409

При обработке данных была произведена выбраковка сомнительного значения КН  $^{60}\text{Co}$ , соответствующего дерново-подзолистой супесчаной почве – ПД(П). Поскольку  $n \geq 10$ , использовалось «правило трех сигм»: если  $X_{\text{экстр}}$  лежит вне области, оно может быть отброшено как выброс (среднее значение и стандартное отклонение рассчитываются без учета  $X_{\text{экстр}}$ ).

Квадрат множественного коэффициента корреляции (коэффициент детерминации) составляет 0.73. Таким образом, с помощью выбранных модели и набора переменных можно объяснить 73 % вариабельности результативного признака. Данный результат свидетельствует о корректности предложенных подходов для оценки роли эдафических факторов в биологической доступности  $^{60}\text{Co}$ .

В таблице 5 приведены коэффициенты  $B$  регрессионного уравнения (4). Если их подставить в формулу (4), то получим линейное регрессионное уравнение, связывающее физико-химические показатели состояния почв с накоплением  $^{60}\text{Co}$  в вегетативной массе ячменя:

$$\begin{aligned} \text{КН } ^{60}\text{Co} = & (0.033 \pm 0.005) - (0.016 \pm 0.021) \times \text{Фактор1} - (0.008 \pm 0.009) \times \text{Фактор2} - \\ & (0.008 \pm 0.006) \times P_2O_5 \text{ подв} - (0.007 \pm 0.008) \times CaCO_3 - (0.003 \pm 0.012) \times K_2O \text{ подв} - (0.001 \pm 0.019) \times \\ & Co_{\text{кисл.}} \end{aligned} \quad (5)$$

В результате анализа полученных данных установлено (табл. 6), что наибольший вклад в варьирование результативного признака (КН  $^{60}\text{Co}$ ) вносит показатель «содержание подвижного фосфора» (частный  $r^2_P = 0.23$ ), далее, в порядке убывания следуют: группа показателей, объединенных под названием фактор 2 (частный  $r^2_{\text{факт.2}} = 0.099$ ), содержание свободных карбонатов (частный  $r^2_{CaCO_3} = 0.097$ ), группа показателей, объединенных под названием фактор 1 (частный  $r^2_{\text{факт.1}} = 0.079$ ), содержание подвижного калия (частный  $r^2_K = 0.008$ ).



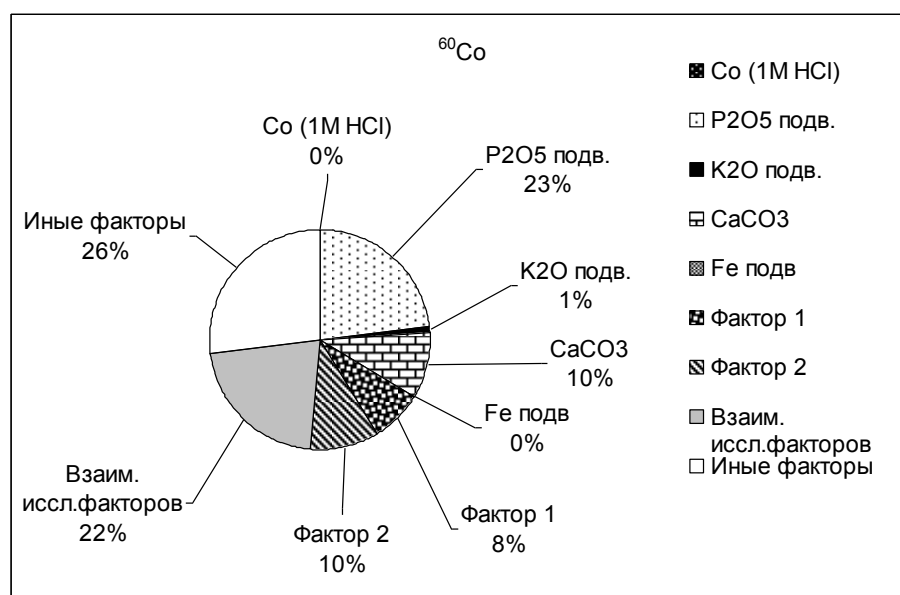
**Оценка вклада независимых переменных  
в варьирование величины КН <sup>60</sup>Со**

Показатель	Бета	Частная	Получаст	Толеран.	R-квадр.	t(9)	p-уров.
Со <sub>кисл.</sub> , МГ/КГ	-0,04	-0,02	-0,01	0,09	0,91	-0,06	0,96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> подв. МГ/КГ	-0,31	-0,48	-0,28	0,82	0,18	-1,45	0,19
K <sub>2</sub> O подв. МГ/КГ	-0,11	-0,09	-0,05	0,17	0,83	-0,24	0,82
CaCO <sub>3</sub> , %	-0,27	-0,31	-0,17	0,38	0,62	-0,87	0,42
Fe, МГ/КГ	0,00	0,00	0,00	0,21	0,79	0,00	1,00
Фактор 1	-0,58	-0,28	-0,15	0,07	0,93	-0,77	0,47
Фактор 2	-0,31	-0,32	-0,17	0,31	0,69	-0,88	0,41

Показатели «содержание подвижного железа и стабильного кобальта» практически не оказывают влияния на варьирование результивного признака: частные  $r^2_{Fe}$ ,  $r^2_{Co} \rightarrow 0$ . Напомним, что квадрат частной корреляции между конкретной независимой переменной и результивным признаком (зависимой переменной), представляет собой долю остаточной дисперсии последнего после корректировки его значений относительно других независимых переменных.

Таким образом, содержание подвижного фосфора, кислотность почв + соотношение алифатических и ароматических частей органических молекул в гуматах и содержание свободных карбонатов оказывают наибольшее влияние на снижение величины КН <sup>60</sup>Со. Количественный и качественный состав органического вещества почв, гранулометрический состав последних оказывают менее значимое воздействие на корневое поглощение <sup>60</sup>Со, а подвижный калий, присутствующий в почвах, – слабое. В то время содержание кислоторастворимого стабильного кобальта и подвижного железа не влияют на корневое поглощение <sup>60</sup>Со. Все вышеперечисленные показатели связаны с зависимой переменной обратно пропорциональной зависимостью.

Полученные результаты позволяют ранжировать выбранные физико-химические показатели состояния почв по степени влияния на величину коэффициента накопления <sup>60</sup>Со ячменем: содержание подвижного фосфора > кислотность почв + соотношение алифатических и ароматических частей органических молекул в гуматах > свободные карбонаты (кальция и магния) > количественный и качественный состав органического вещества почв и их гранулометрический состав > подвижный калий (рис. 2).



**Рис. 2. Вклад эдафических факторов в вариабельность результивного признака – КН <sup>60</sup>Со**

Общий их вклад в варьирование КН  $^{60}\text{Co}$  составляет 51 %. Вклад неучтенных факторов в варьирование КН  $^{60}\text{Co}$  равен 27 %. Оставшиеся 22 % можно интерпретировать взаимодействием исследуемых эдафических факторов.

На рис. 3 показана диаграмма рассеяния предсказанных и наблюдаемых значений зависимой переменной – КН  $^{60}\text{Co}$ .

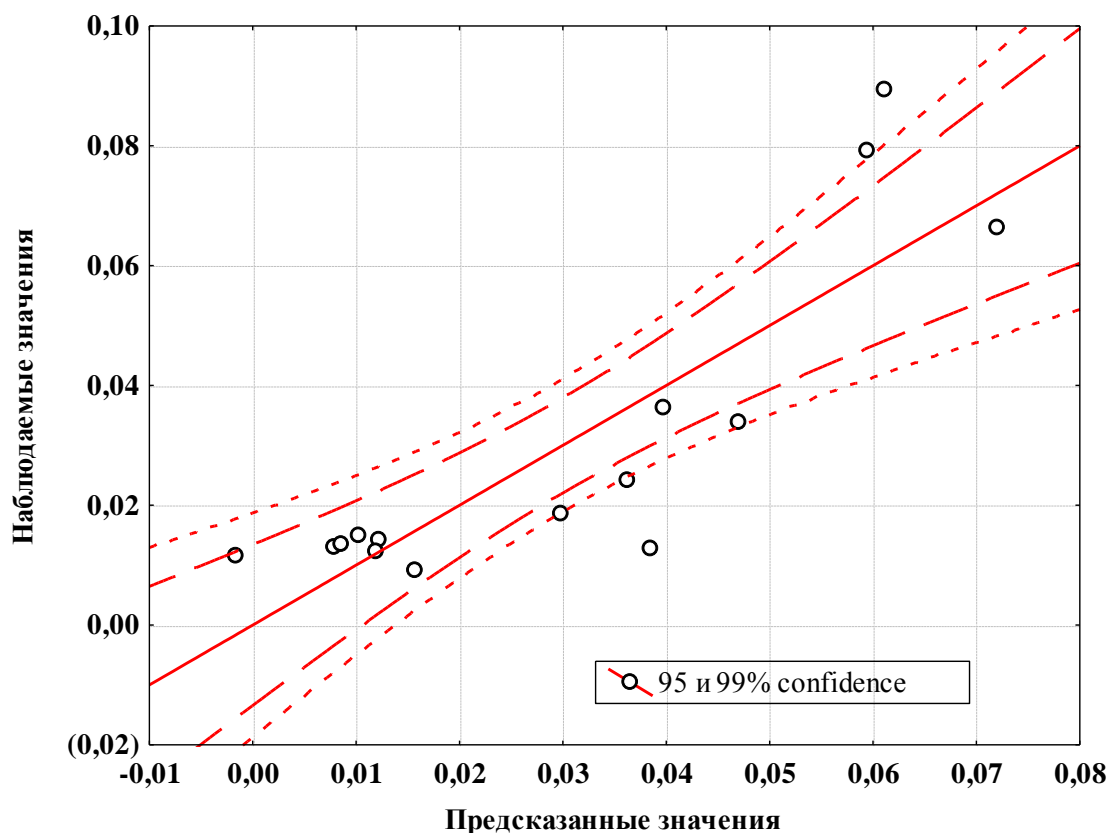


Рис. 3. Результаты множественного регрессионного анализа для зависимой переменной (КН  $^{60}\text{Co}$ ) – наблюдаемые и предсказанные моделью данные

Как видно из этого рисунка, 60 % экспериментально установленных значений зависимой переменной укладываются в диапазон вдоль линии регрессии, соответствующий 95 %-й доверительной вероятности. При расширении соответствующего диапазона до уровня доверительной вероятности 99 % в него попадает уже 80 % экспериментальных точек.

Проверку адекватности предложенной линейной регрессионной модели экспериментальным данным проводили визуально, с помощью построения нормального вероятностного графика остатков. В нашем случае распределение остатков (разности между экспериментальными и полученными при помощи уравнения регрессии значениями зависимой переменной) хорошо укладывалось на прямую линию, что свидетельствует о нормальном распределении остатков и линейности связи между независимыми и зависимой переменными.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о корректности и приемлемости предложенного подхода, включающего изначальный выбор показателей состояния почв, проведение факторного и множественного регрессионного анализов для выяснения влияния почвенных характеристик на подвижность  $^{60}\text{Co}$  в системе почва – растение.

Как и ожидалось, влияние природного Со (присутствующего в подвижной кислоторастворимой форме) на снижение корневого поглощения  $^{60}\text{Co}$  в результате конкурентного взаимодействия соответствующих ионов в системе почва – растение не выявлено. Однако, отсутствие связи между корневым поглощением тест-растениями  $^{60}\text{Co}$  и

содержанием в почвах подвижного железа вызывает вопросы, которые требуют прояснения в том числе и с помощью дополнительных экспериментов на большей по объему выборке почв в более широком диапазоне изменения их кислотности и гранулометрического состава.

**Определение инактивирующей способности (буферности) почв в отношении  $^{60}\text{Co}$  с использованием тест-растений.**

В рамках стратегий, направленных на минимизацию последствий техногенного загрязнения земель сельскохозяйственного назначения, особое значение имеет понятие устойчивости системы почва – сельскохозяйственные растения к повышенным уровням содержания поллютантов. Для радионуклидов и ТМ в соответствии с ранее изложенными соображениями, это означает способность данной системы, вследствие присущих почвам буферных свойств, ограничивать подвижность радионуклидов и ТМ, и таким образом контролировать транслокацию последних в хозяйственно ценные части урожая. Соответственно, представляется разумным сравнить способность различных почв ограничивать корневое поступление поллютантов в культурные растения) с помощью какого-либо унифицированного показателя, разработанного на основе единого методологического подхода.

Исходя из подхода, представленного выше и позволяющего оценить вклад различных эдафических факторов в миграционную способность  $^{60}\text{Co}$  в системе почва – растение с использованием тест-растений, легко оценить и сравнить инактивирующую способность исследованных почв (ИСП) в отношении данного радионуклида. Для этого можно воспользоваться формулой:

$$ИСП_i = \sum_{j=1}^m (Q_j \times \frac{X_{i,j} - X_{i,\min}}{X_{i,\max} - X_{i,\min}}), \quad (6)$$

где  $ИСП_i$  – инактивирующая способность  $i$ -ой почвы в отношении изучаемого радионуклида,  $Q_j$  – вклад соответствующего эдафического фактора (почвенной характеристики:  $C_{орг.}$ ,  $P_2O_5_{подв}$  и др.) в варьирование резульативного признака ( $КН$   $^{60}\text{Co}$ ), выраженный через частный коэффициент детерминации,  $r^2_j$  (см. выше). Вклад каждой из взаимосвязанных между собой переменных ( $C_{орг.}$ ,  $C(ГК)/C(ФК)$ ,  $Фракция < 0.01$  мм, а также  $pH(KCl)$  и  $E_4/E_6$ ) в варьирование резульативного признака должен помимо вклада соответствующего функционала (частного  $r^2_{факт.1}$  или  $r^2_{факт.2}$ ) также учитывать вклад каждого из вышеуказанных показателей в варьирование самих функционалов, т.е., частных  $r^2_{C_{орг.}} = 0.61$ ,  $r^2_{CГК/СФК} = 0.69$ ,  $r^2_{Фр<0.01} = 0.64$  и частных  $r^2_{pH(KCl)} = 0.75$ ,  $r^2_{E4/E6} = 0.41$ . Достигается это путем перемножения значений вкладов соответствующих факторов ( $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ) в варьирование  $КН$   $^{60}\text{Co}$  и вкладов соответствующих переменных в  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Знак вклада соответствующего показателя (эдафического фактора) в  $ИСП_i$  определяется знаком соответствующего частного коэффициента корреляции: при отрицательном значении  $r_j$ ,  $Q_j$  будет положительным, и наоборот.

Как и ожидалось, для черноземов величины  $ИСП_i$  оказались выше, чем для дерново-подзолистых и серых лесных почв. Однако, ввиду того, что определяющим фактором в ограничении перехода  $^{60}\text{Co}$  в растения оказалось содержание в почвах подвижного фосфора, а вовсе не количественный и качественный состав органического вещества и степень дисперсности минеральных частиц, то эти расхождения оказались не столь существенными, как ожидалось.

Значения соответствующих величин  $Q_j$ , а также рассчитанные в долях единицы значения  $ИСП_i$  приведены в табл. 7.

Таблица 7

## Показатели, характеризующие ИСП исследуемых почв

Почва	Сорг. В почве, %	K <sub>2</sub> O подв., мг/кг	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> подв., мг/кг	CaCO <sub>3</sub> , %	Fe подв., мг/кг	pH(KCl)	C(ГК)/C(ФК)	E4/E6	Фракция <0,01 мм, %	Co (1M HCl), мг/кг	ИСП <sub>i</sub>
<b>Q<sub>j</sub></b>	0,048	0,008	0,230	0,097	0,000	0,075	0,054	-0,041	0,050	0,000	
Ч <sup>0</sup> (Еф)	0,65	0,26	0,06	0,03	0,14	0,09	0,52	0,36	0,69	0,54	<b>10,6</b>
Ч <sup>B</sup> (Ел)	0,65	0,42	0,67	0,09	0,27	0,73	0,40	0,01	0,66	0,58	<b>30,6</b>
ДК(Ки)	1,00	1,00	0,17	0,73	0,39	0,81	0,15	0,55	0,53	0,44	<b>23,9</b>
Ч <sup>0</sup> (Ст)	0,52	0,56	0,18	1,00	0,32	0,86	0,38	0,40	0,67	0,62	<b>27,0</b>
Ч <sup>Ю</sup> (А)	0,33	0,64	0,21	0,06	0,89	0,90	0,33	0,08	1,00	1,00	<b>20,8</b>
Ч <sup>B</sup> (Ес)	0,73	1,28	0,25	0,05	0,25	0,59	0,33	0,07	0,99	0,31	<b>21,6</b>
Ч <sup>Г</sup> (В)	0,72	0,57	0,39	0,01	0,28	0,28	0,46	0,01	0,90	0,65	<b>22,1</b>
Ч <sup>B</sup> (К)	0,45	0,22	0,30	0,01	0,00	0,45	0,14	0,03	0,47	0,34	<b>15,8</b>
Ч <sup>Г</sup> (Р)	0,72	0,59	0,46	0,01	0,18	0,46	1,00	0,00	0,86	0,67	<b>27,8</b>
Л <sup>С</sup> (В)	0,18	0,19	0,31	0,04	0,20	1,00	0,27	0,13	0,29	0,24	<b>18,3</b>
П <sup>Д</sup> (К)	0,00	0,13	0,07	0,01	0,33	0,43	0,00	0,24	0,38	0,20	<b>5,9</b>
П <sup>Д</sup> (Ж)	0,43	0,04	0,00	0,00	0,45	0,00	0,03	0,86	0,25	0,18	<b>0,1</b>
П <sup>Д</sup> (Т)	0,08	0,00	0,48	0,00	0,33	0,15	0,11	1,00	0,32	0,28	<b>10,9</b>
Л <sup>СВ</sup> (Д)	0,29	0,23	0,38	0,01	1,00	0,32	0,19	0,72	0,31	0,54	<b>12,6</b>
П <sup>Д</sup> (Н)	0,08	0,31	1,00	0,03	0,31	0,41	0,06	0,45	0,46	0,26	<b>27,8</b>
П <sup>Д</sup> (П)	0,02	0,12	0,15	0,00	0,15	0,35	0,08	0,71	0,00	0,00	<b>3,9</b>
<b>X<sub>min</sub></b>	0,77	53,70	29,00	0,08	621	4,77	0,36	3,62	18,40	2,08	
<b>X<sub>max</sub></b>	5,65	230,0 0	473,00	6,79	6635	7,55	3,60	5,14	81,60	7,74	

### Заключение

В настоящей работе приводится попытка установления количественного вклада различных эдафических факторов (точнее, показателей, отражающих физико-химические свойства почв) в снижение биологической доступности радиоактивного <sup>60</sup>Со, выраженной через коэффициент накопления радионуклида тест-растениями с использованием подходов, предложенных В.Б. Ильиным и Г.Я. Ринькисом, анализа результатов собственных [23–29] и литературных [30] данных с учетом природного разнообразия физико-химических свойств разных типов, видов и разновидностей минеральных почв Европейской части России, для этого была проведена многоэтапная процедура. Сначала с помощью факторного анализа (метода главных компонент) количество входных переменных (физико-химических показателей состояния почв) было редуцировано: взаимозависимые переменные были представлены в виде ортогональных факторов, представляющих собой их линейные комбинации. В итоге было отобрано пять независимых (ортогональных) переменными, две из которых являлись сложными и были обозначены как фактор 1 и фактор 2. Это позволило использовать модель множественной линейной корреляции между физико-химическими показателями состояния почв и КН <sup>60</sup>Со. После параметризации и проверки адекватности регрессионных моделей, полученные с их помощью результаты, были использованы для ранжирования выбранных физико-химических показателей состояния почв по степени

влияния на величину коэффициента накопления радионуклида ячменем: содержание подвижного фосфора > кислотность почв + соотношение алифатических и ароматических частей органических молекул в гуматах > свободные карбонаты (кальция и магния) > количественный и качественный состав органического вещества почв и их гранулометрический состав > подвижный калий. Общий их вклад в варьирование КН  $^{60}\text{Co}$  составляет 51 %.

Влияние природного Со на снижение корневого поглощения  $^{60}\text{Co}$  в результате конкурентного взаимодействия соответствующих ионов в системе почва – растение не выявлено. Кроме того, установлено, что значительная часть стабильного кобальта в почвах зафиксирована в недоступном растениям состоянии, а потенциально доступные его количества (извлекаемые с помощью 1 М HCl вытяжки) составляют, в среднем, всего лишь около 35 % от валового количества. Однако, отсутствие связи между корневым поглощением тест-растениями  $^{60}\text{Co}$  и содержанием в почвах подвижного железа вызывает вопросы, которые требуют прояснения в том числе и с помощью дополнительных экспериментов на большей по объему выборке почв в более широком диапазоне изменения их кислотности и гранулометрического состава.

Значения величин  $ИСП_i$  исследованных почв, рассчитанные в долях единицы, варьировали в диапазоне 0.001÷0.306.

Как и ожидалось, для черноземов величины  $ИСП_i$  оказались выше, чем для дерново-подзолистых и серых лесных почв. Однако, ввиду того, что определяющим фактором в ограничении перехода  $^{60}\text{Co}$  в растения оказалось содержание в почвах подвижного фосфора, а вовсе не количественный и качественный состав органического вещества и степень дисперсности минеральных частиц, то эти расхождения, вопреки первоначальным предположениям, оказались не столь существенными.

#### Примечания:

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Практикум по агрохимии. / Под ред. В.Г. Минеева. М.: МГУ, 2001. 689 с.
3. Практикум по почвоведению / под ред. И.С. Кауричева. М.: Колос, 1980. 272 с.
4. Kononovova M.M. Soil organic Matter; Its nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility. Oxford. Pergamon Press, 1966. 544 p.
5. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (изд. 2-е, перераб. и дополненное). М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
6. Обухов А.И., Плеханова И.О. Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях. М.: Изд-во Московского университета, 1991. 184 с.
7. ISO 22036-2008. Soil quality – Determination of trace elements in extracts of soil by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES)
8. Ильин В.Б. Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // Агрехимия. 1995. № 10. С. 109–113.
9. Васильевская В.Д. Устойчивость почв к антропогенным воздействиям / Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв. / Под ред. Д.С. Орлова, В.Д. Васильевской. М.: МГУ, 1994. С. 61–79.
10. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Эдиторал УРСС, 1999. 168 с.
11. Романова Т.А., Ивахненко Н.Н. Устойчивость пахотных почв Белоруссии к химическому загрязнению // Почвоведение. 2003. № 6. С. 754–763.
12. Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Паэгле Г.В., Куницкая Т.А. Система оптимизации и методы диагностики минерального питания растений. Рига: Зинатне, 1989. 196 с.
13. Алексахин Р.М. Радиоактивное загрязнение почвы и растений. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 132 с.
14. Радиоактивность и пища человека / Под ред. Рассела Р.С. Пер. с англ. под ред. Ключковского В.М. М.: Атомиздат, 1971. 375 с.
15. Тихомиров Ф.А., Прохоров В.М., Моисеев А.А. и др. Нахождение связи между поступлением цезия-137 в растения и свойствами почвы // Агрехимия. 1978. № 8. С. 116–124.

16. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. Изд-е 4-е перераб. и доп. М.: Изд-во «Химия», 1971. 454 с.
17. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
18. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. Под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
19. Теория вероятностей и математическая статистика. Математические модели / В.Д. Мятлев, Л.А. Панченко, Г.Ю. Ризниченко, А.Т. Терехин. М.: Изд. Центр «Академия», 2009. 320 с.
20. Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.
21. Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А. Применение факторного анализа для выявления структурной организации генетических систем биосинтеза запанных белков и изоферментов // Генетика. 1990. т.26. №2. С 341–348.
22. Cattell, R.V. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*. Vol. 1. Is. 2. pp. 245–276.
23. Лаврентьева Г.В., Круглов С.В., Анисимов В.С. Динамика катионного состава почвенного раствора известкованной дерново-подзолистой почвы при загрязнении Со и Сд и изменении рН // Почвоведение. 2008. №9. С. 1092–1100.
24. Круглов С.В., Анисимов В.С., Лаврентьева Г.В., Анисимова Л.Н. Параметры селективной сорбции Со, Си, Zn и Сд дерново-подзолистой почвой и черноземом // Почвоведение 2009. № 4. С. 419–428
25. Фригидов Р.А., Анисимов В.С., Фригидова Л.М. Изучение динамики форм нахождения  $Zn^{65}$ ,  $Co^{60}$ ,  $Cs^{137}$  в почвах и накопления их проростками ячменя //Мат. III Межд. конф. «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». 23–27.06.2009 г. Томск: STT. С. 622–626.
26. Анисимов В.С., Кочетков И.В., Круглов С.В. и др. Влияние органического вещества на параметры селективной сорбции кобальта и цинка почвами и выделенными из них илистыми фракциями. // Почвоведение. 2011. № 6. С. 675–684.
27. Кочетков И.В., Анисимов В.С., Крикунов И.А., Еремин М.В. Влияние физико-химических свойств почв на биологическую доступность  $Co^{60}$ . // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2011. №4 С. 50–58.
28. Анисимов В.С., Кочетков И.В., Анисимова Л.Н., Дикарев Д.В. Влияние физических и химических показателей состояния почв на подвижность и биологическую доступность  $^{65}Zn$ . // Материалы IV международной конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. С. 53–55.
29. Спирин Е.В., Анисимов В.С., Дикарев Д.В., Кочетков И.В., Крыленкин Д.В. Модель прогноза коэффициентов накопления  $^{137}Cs$  в растениях. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2013, том 53, № 2. С. 1-8.
30. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва- растение /Отв. редактор А.И. Сысо. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т почвоведения и агрохимии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.

### References:

1. Methods for agrochemical soil survey. М.: Nauka, 1975. 656 p.
2. Mineev V.G. (Ed) Practical course on agrochemistry. М.: MSU, 2001. 689 p.
3. Kaurichev I.S. (ed) Practical course on soil science. М.: Kolos, 1980. 272 p.
4. Kononovova M.M. Soil organic Matter; Its nature, Its Role in Soil Formation and in Soil Fertility. Oxford. Pergamon Press, 1966. 544 p.
5. Methodological guides for HM determination in farm soils and plant products (edition 2 revised and enlarged). М.: CINAО, 1992. 61 p. Obukhov A.I., Plekhanova I.O. Atomic absorption analysis in soil-biological investigations. М.: Moscow University Press, 1991. 184 p.
6. ISO 22036-2008. Soil quality – Determination of trace elements in extracts of soil by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES)

7. Ilyin V.B. Estimation of soil buffering with respect to heavy metals // *Agrokhimia*. 1995. No 10. pp. 109-113.
8. Vasilievskaya V.D. Soil resistance to anthropogenic effects / Soil-environmental monitoring and soil conservation. M.: MSU, 1994. pp. 61-79.
9. Motuzova G.V. Compounds of microelements in soils: systemic organization, ecological importance, monitoring. M.: Editorial URSS, 1999. 168 p.
10. Romanova T.A., Ivakhnenko N.N. Resistance of arable soils of Belorussia to chemical pollution // *Pochvovedenie*. 2003. No 6. pp. 754-763.
11. Rinkis G.Y., Ramane H.K., Paegle G.V., Kunitskaya T.A. An optimization system and diagnostic methods of plant mineral nutrition. Riga. Zinatne, 1989. 196 p.
12. Alexakhin R.M. Radioactive contamination of soil and plants. M.: USSR Acad. Sci. Publisher, 1963. 132 p.
13. Rassel R.S. (Ed) radioactivity and human food (translation from English). M.: Atomizdat, 1971. 375 p.
14. Tikhomirov F.A., Prokhorov V.M., Moiseev A.A., et al. Finding the relation between  $^{137}\text{Cs}$  uptake by plants and soil properties // *Agrokhimia*. No 8. 1978. pp. 116-124.
15. Lurie Yu. Yu. Handbook of analytical chemistry. Edition 4 revised and enlarged. M.: «Chimia», 1971. 454 p.
16. Barber S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York, 1995. 376 p.
17. Aivazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Applied statistics: relationships study. M.: Financy i Statistika, 1985. 487 p.
18. Myatlev V.D., Panchenko L.A., Rizinchenko G.Y., Terekhin A.T. The theory of probability and mathematical statistics. Mathematical models. M.: Publ. Center "Akademia", 2009. 320 p.
19. Sarapultsev B.I., Geraskin S.A. Genetic principles of radioresistance and evolution. M.: Energoatomizdat, 1993. 208 p.
20. Sarapultsev B.I., Geraskin S.A. The use of factor analysis to identify structural organization of genetic systems of biosynthesis of reserve proteins and izoenzymes // *Genetika*. 1990. Vol. 26. No.2. pp. 341-348.
21. Cattell R.B. The scree test for the number of factors // *Multivariate Behavioral Research*. 1966. Vol. 1. Is. 2. pp. 245-276.
22. Lavrent'eva G.V., Kruglov S.V., Anisimov V.S. Dynamics of the Soil Solution Cationic Composition in a Limed Soddy-Podzolic Soil Contaminated with Co and Cd at Variable pH // *Eurasian Soil Science*. 2008. Vol. 41. No 9. pp. 965-972.
23. Kruglov S.V., Anisimov V.S., Lavrent'eva G.V., Anisimova L.N. Parameters of Selective Sorption of Co, Cu, Zn and Cd by a Soddy-Podzolic Soil and a Chernozem // *Eurasian Soil Science*. 2009. Vol. 42. No 4. pp. 385-393.
24. Frigidov R.A., Anisimov V.S., Frigidova L.M. The Study of  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  Soil Forms Dynamics and Bioavailability in Different Soils // *Proceedings of III International Conference "Radioactivity and Radioactive Elements in Environment"*. (Tomsk Polytechnic University, June 23-27, 2009). Tomsk. STT Publ. 2009. P. 622-626. (in Russian)
25. Anisimov V.S., Kochetkov I.V., Kruglov S.V., Alexakhin R.M. Effect of Organic Matter on the Parameters of the Selective Sorption of Cobalt and Zinc by Soils and Their Clay Fractions// *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44. No 6. pp. 618-627.
26. Kochetkov I.V., Anisimov V.S., Krikunov I.A., Eremin M.V. The Influence of Physico-Chemical Properties of Soils on the Bioavailability of  $^{60}\text{Co}$  // *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering*. 2011. No 4. P.50-58. (in Russian)
27. Anisimov V.S., Kochetkov I.V., Anisimova L.N., Dikarev D.V. The Influence of Soil Physical and Chemical Characteristics on  $^{65}\text{Zn}$  Bioaccessibility // *Proceedings of IV International Conference "Radioactivity and Radioactive Elements in Environment"* (Tomsk Polytechnic University, June 4-8, 2013). TPU Publishing. 2013. pp. 53-55 (in Russian)
28. Spirin E. V., Anisimov V. S., Dikarev D. V., Kochetkov I. V., Krylenkin D. V. Forecasting Model of Transfer of  $^{137}\text{Cs}$  to the Plants // *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2013. Vol. 53. No 2. pp. 1-8 (in Russian)
29. Il'in V.B. Heavy metals and non-metals in the system soil – plant / Executive editor A. I. Syso. Novosibirsk. Publishing House SB RAS 2012. 220 p. (in Russian)

УДК 544.582 546.73 631.412 633.16

**Влияние физико-химических характеристик почв на биологическую доступность  $^{60}\text{Co}$** <sup>1</sup> Вячеслав Сергеевич Анисимов<sup>2</sup> Дмитрий Владимирович Дикарев<sup>3</sup> Лидия Николаевна Анисимова<sup>4</sup> Юрий Николаевич Корнеев<sup>5</sup> Илья Владимирович Кочетков

<sup>1-5</sup> ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», Российская Федерация

249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе,

<sup>1</sup> Кандидат биологических наук, заведующий лабораторией

E-mail: vsanisimov@list.ru

<sup>2</sup> Научный сотрудник

<sup>3</sup> Кандидат биологических наук, научный сотрудник

E-mail: lanisimovan@list.ru

<sup>4</sup> Научный сотрудник

E-mail: yunkorneev@mail.com

<sup>5</sup> Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

E-mail: ikochetkoff@gmail.com

**Аннотация.** На основании исследования зависимости между физико-химическими характеристиками различных минеральных почв, в которые предварительно было внесено одинаковое количество  $^{60}\text{Co}$ , и накоплением этого радионуклида в надземных частях тест-растений была оценена способность почв ограничивать подвижность радионуклида в системе почва – растение (инактивирующая способность почв – ИСП). Для оценки последней в отношении  $^{60}\text{Co}$  был проведен в контролируемых условиях модельный вегетационный эксперимент с использованием в качестве тест-растения ячменя (*Hordeum vulgare* L.). С целью обеспечения широкого диапазона варьирования изучаемых физико-химических показателей были отобраны почвенные образцы из пахотных и гумусово-аккумулятивных горизонтов 16 типов, видов и разновидностей почв, относящихся к разным климатическим зонам европейской части РФ в количестве достаточном для проведения вегетационных опытов и определения физико-химических характеристик почв. На основании полученных экспериментальных результатов было определено влияние каждого из выбранных показателей состояния почв на процесс накопления радионуклида растениями. Для этого, с использованием метода главных компонент были отобраны независимые переменные (физико-химические показатели состояния почв), которые, как предполагалось, оказывают влияние на поглощение  $^{60}\text{Co}$  растениями. Далее, на основании частных коэффициентов корреляции, рассчитанных с помощью линейной регрессионной модели, был оценен вклад почвенных характеристик в ИСП и произведено их ранжирование. Непосредственно значения ИСП в отношении исследуемого радионуклида, выраженные в баллах, для каждой почвы были получены расчетным путем в виде суммы произведений вкладов соответствующих почвенных характеристик в варьирование результативного признака (КН  $^{60}\text{Co}$ ) на безразмерную величину, равную отношению разности конкретных и минимальных значений почвенных характеристик в выборке к размаху варьирования соответствующих переменных в выборке.

**Ключевые слова:**  $^{60}\text{Co}$ , природный кобальт, почвы, физико-химические характеристики, ячмень, коэффициент накопления, формы нахождения, факторный анализ, регрессия, инактивирующая способность.



Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation  
Biogeosystem Technique  
Has been issued since 2014.  
ISSN: 2409-3386  
E-ISSN: 2413-7316  
Vol. 6, Is. 4, pp. 345-362, 2015

DOI: 10.13187/bgt.2015.6.345  
[www.ejournal19.com](http://www.ejournal19.com)



UDC 631,416,848

### Thermodynamic Status of Strontium in Chernozem at Application of Phosphogypsum

<sup>1</sup>Anatoly P. Endovitsky  
<sup>2</sup>Tatyana M. Minkina  
<sup>3</sup>Valery P. Kalinitchenko

<sup>1,3</sup>Institute of Soil Fertility of South Russia, Russian Federation  
346493 Persianovka, Rostov Region

<sup>2</sup>Southern Federal University, Russian Federation  
344006 Rostov-on-Don, Russian Federation  
Bolshaya Sadovaya Str., 105

<sup>1</sup>Expert

<sup>2</sup>Dr of Sc (Biol), Professor, Head of Department of Soil Science and Land Evaluation  
E-mail: [tminkina@mail.ru](mailto:tminkina@mail.ru)

<sup>3</sup>Dr of Sc (Biol), Professor, Director  
E-mail: [kalinitch@mail.ru](mailto:kalinitch@mail.ru)

#### Abstract

The thermodynamic state of major ions and Sr in carbonate chernozem of the Krasnodar Territory in making it phosphogypsum at doses of 10, 20, 40 t/ha is researched in the model experiment. On a basis of classical theory of electrolytes of solution in a model system, the mathematical model is proposed for calculating the thermodynamic state of Sr in the soil solution and the aqueous extract using the molar concentration values of the formal charge of the ions and ion pairs, as well as their activity coefficients. Given the association of ions and ionic strength the Sr activity in water extract compared to the ideal solution depending on the dose of phosphogypsum 10, 20, 40 t/ha reduces by 40; 44; 52 %. Estimated activity of Ca<sup>2+</sup> is decreased, respectively, by 41; 44; 53 %. It is a thermodynamic explanation of the increase of molar concentration of Ca/Sr ratio in soil at phosphogypsum apply.

The thermodynamic state of Sr in chernozem shows that at a dose of phosphogypsum 34 t/ha the molar concentration of Ca/Sr ratio does not reach a dangerous value in terms of the occurrence of the Kashin-Beck disease.

**Keywords:** chernozem, phosphogypsum, reclamation, ion thermodynamic state, Sr, association, activity, form of ion.

#### Введение

Состояние почв в условиях техногенного воздействия является современной экологической проблемой [1–5]. Sr является одним из особо опасных загрязняющих почву химических элементов. Внедрение Sr вместо Ca в структуру костной ткани живого организма вызывает урскую болезнь – хрупкость и травмы скелета, травмы внутренних органов.

Полагают, что урвовская болезнь наступает при пониженном соотношении весовых концентраций Ca/Sr [6]. В работе [7] указано, что в Амурской области, где распространена урвовская болезнь, содержание валового Ca в почвах не превышает 1 %. В работе [6] показано, что в районах Курской области, где в черноземах соотношение Ca/Sr=200, аномалии развития и признаки избыточной хрупкости костной ткани опорно-двигательной системы человека достоверно отсутствуют. В почвах Черноземья отношение Ca/Sr составляет в среднем 111. Анализ данных В.В. Ковальского [8] и других исследователей позволяет принять в качестве удовлетворительного с точки зрения охраны здоровья населения весовое соотношение Ca/ Sr в почве более 60.

В пресных водах концентрация Sr обычно намного ниже 1 мг/дм<sup>3</sup>, но встречаются районы с повышенной концентрацией этого иона в водах. Предельно-допустимая концентрация (ПДК) Sr в питьевой воде составляет 7 мг/дм<sup>3</sup> [6]. Кларк Sr в земной коре равен 340 мг/кг [9], варьирование в пределах 170–400 [10]. Среднее содержание Sr в почвах составляет 18–3500 мг/кг, причем наиболее высокие показатели характерны для черноземов и серых лесных почв России. Почвы, развитые на ледниковых отложениях в условиях гумидного климата Дании, очень бедны Sr, тогда как почвы такого же типа в США относительно богаты этим элементом. Среднее содержание Sr в верхнем слое почв США составляет 110–445 мг/кг. Наивысшие значения отмечены в почвах пустыни и почвах, развившихся на магматических породах [11]. Норматив ПДК Sr в почве не установлен. Содержание Sr 600 мг/кг принято считать верхней границей нормального содержания валового Sr в почвах [2].

Фосфогипс – один из основных промышленных источников загрязнения окружающей среды [12, 13]. Он содержит в своем составе более 60 химических элементов [7]. Свойства фосфогипса существенно варьируют в зависимости от источника происхождения сырья, использованного для приготовления удобрений.

Иллювиальный горизонт в солонцовых почвах, слитой горизонт в черноземах, уплотненная плужная подошва в пахотных почвах неблагоприятно влияют на плодородие. Многие ареалы черноземов обыкновенных в Краснодарском крае подвержены слитизации в связи с наличием обменного натрия, повышенным содержанием обменного магния в ППК, минералогическим составом, условиями формирования почвы [14–17]. Твердость верхнего обрабатываемого слоя 0–20 см относительно большая, 300–350 psi, но плотность нижележащего слоя столь велика, что пенетrometer вглубь просто не идет – 500 и более psi. Это означает антропогенную элювиально-иллювиальную дифференциацию почвенного профиля. Если по Определителю [16] – это солонец. Имеет место клиновидная форма структурных составляющих почвы в слое 30–60 см – по Определителю [16] это признак слитости. Для мелиорации черноземов и почв каштаново-солонцового комплекса применяют фосфогипс в дозах 10–30 т/га [2, 6, 14, 18–29]. Полагают возможным применять дозы до 40 т/га на основе экологического контроля [1, 3, 18, 29]. Доза фосфогипса 40 т/га апробирована нами с точки зрения его утилизации [22, 30]. Черноземы положительно отзываются на внесение в них фосфогипса [3, 22, 30, 31–38]. Фосфогипс вносят под трехъярусную вспашку на глубину до 40–45 см или глубокое безотвальное рыхление до 40–45 см [18, 19, 40]. Нами показано, что утилизацию фосфогипса следует проводить в черноземе в процессе роторной обработки слоя 20–40 см (30–60 см) [3, 22, 30–37, 39, 41–53]. Такое размещение мелиоранта обеспечивает его непосредственное воздействие на подлежащий мелиорации иллювиальный горизонт почвы [54]. Мы проводили производственные эксперименты, разрушали плотный слой почвы 30–60 см, вносили в него фосфогипс. Твердость почвы в слое 30–60 см уменьшалась до 300 psi, причем по сравнению со стандартом обработки твердость почвы уменьшалась также и в верхнем слое [22].

Фосфогипс оказывает разрыхляющее действие на органо-минеральную слитую часть почвы в силу эффекта сульфатной коррозии, что позволяет преодолеть слитизацию почвы. Фосфогипс имеет слабокислую реакцию pH=4,2–5,0, содержит P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,5 %, что увеличивает доступность фосфора как исходного в почве, так и внесенного с фосфогипсом [1]. Улучшаются агрофизические свойства почвы, повышается урожайность возделываемых на мелиорированной почве сельскохозяйственных культур [1, 22, 24].

Полагают, что существует потенциальная возможность накопления вредных веществ в почве при мелиорации фосфогипсом [26]. Внесение их в почву в составе фосфогипса следует

контролировать с экологической точки зрения [1]. Однако существенных изменений уровня загрязнения растительных продуктов в случае внесения фосфогипса в рекомендуемых дозах как в краткосрочной, так и в долгосрочной практике, не зарегистрировано. Основным сырьем, при переработке которого получают отход фосфогипса, является практически не радиоактивный апатит Ковдорского месторождения. После внесения такого фосфогипса радиоактивность почвы остается на уровне естественного радиоактивного фона. Вместе с тем, если использовано другое сырье, например, апатит из Марокко, радиоактивность фосфогипса за счет содержащегося в нем Sr существенно возрастает. Проблема оптимизации доз фосфогипса для чернозема в отношении свинца и кадмия с точки зрения минимизации загрязнения была решена на базе термодинамических представлений о состоянии электролитов в почвенных растворах [42–44]. В отношении Sr таких исследований не проводилось.

Цель работы: предложить модель термодинамического состояния Sr в черноземе обыкновенном после внесения различных доз фосфогипса.

### Материалы и методы

Термодинамическое состояние главных ионов почвенной системы с учетом Sr до и после внесения в нее нейтрализованного до pH 5,0–5,3 фосфогипса изучено в модельном эксперименте. Почва – чернозем обыкновенный карбонатный южно-европейской фации слабопромерзающий северной зоны Краснодарского края. Образцы чернозема отбирали в районе станицы Каневской из слоя 20–40 см. Исследуемая почва имеет следующие свойства:  $C_{орг.}$  – 2,3 %; pH – 7,5; ЕКО – 36,9 ммоль(+)/100 г; обменные катионы (ммоль(+)/100 г):  $Ca^{2+}$  – 28,5;  $Mg^{2+}$  – 7,8;  $Na^{+}$  – 0,8;  $K_{обм.}$  – 26,6 мг/100 г;  $CaCO_3$  – 0,3 %;  $P_2O_{5подв.}$  – 1,5 мг/100 г; содержание физической глины – 57,4 %, ила – 36,0 %.

Для закладки эксперимента использован фосфогипс – отход производства фосфорной кислоты из апатитового сырья Ковдорского месторождения на Белореченском химкомбинате [7]. Валовое содержание Sr в фосфогипсе 2,7–6,5 г/кг [40], максимум до 13,5 г/кг (образец использован для выполнения эксперимента), количество воднорастворимого Sr – 1,02 г/кг. Дозы вносимого в почву фосфогипса 3,8; 7,6; 15,2 г/кг почвы (эквивалентно дозам 10, 20 и 40 т/га мелиоранта) (табл. 2). Для проведения модельного эксперимента почву измельчали до размера структурных отдельностей не более 2 мм, и перемешивали с фосфогипсом в заданной норме. Влажность почвы поддерживали 28–30 %, через 6 месяцев отбирали образцы почвы. Период достаточен для полного взаимодействия фосфогипса с почвой [48]. Раствор из образцов почвы извлекали путем проведения водной вытяжки при соотношении почва-вода 1:5 [17, 57–59]. Масса образца почвы 1 кг. Повторность эксперимента трехкратная.

Термодинамические свойства почвенных растворов зависят от ассоциации в них главных ионов. Имитацию почвенного раствора проводили методом водной вытяжки, которая в определенной степени подобна почвенному раствору. Результаты водной вытяжки можно использовать для оценки почвенного раствора [60]. Расчет термодинамического состояния Sr в почвенном растворе выполнен путем составления математической модели с использованием молярных концентраций, формальных значений заряда ионов и ионных пар, а также коэффициентов их активности [4–6, 41, 45, 46, 60–68, 52, 53].

Использованы значения констант нестойкости химических соединений по литературным данным [61, 65–68]. Ассоциаты с высокой нестойкостью в расчет не принимали. В почвенном растворе органическое вещество образует протонные комплексы с катионами солей. Процесс образования таких комплексов имеет значение при большом содержании органического вещества в почве на фоне дополнительных условий формирования комплексов с катионами солей [13, 47]. Органическая составляющая почвенного раствора не учитывалась в расчетах, поскольку не были определены концентрации гуминовых и фульвокислот [47, 69]. Включение этих кислот в систему уравнений материального баланса ионов понижает концентрации свободных форм ионов, соответственно, их активность [47]. Следовательно, принятое упрощение модели повышает степень запаса полученных расчетных данных в части учета возможностей пассивирования Sr.

Использованные в расчете уравнения, коэффициенты, параметры соответствуют классической теории состояния электролитов с учетом исследования и моделирования

почвенных растворов [41–48, 50, 66]. Параметры расчета рассмотрены нами ниже при обсуждении уравнений (1–31) и детально обоснованы в предыдущих работах [37, 38, 41–48, 50, 53, 68].

Суммарные концентрации ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$  находили расчетным способом, исходя из общей щелочности раствора  $\text{Alk}_\Sigma$ , pH и константы второй ступени диссоциации угольной кислоты  $K^0(\text{HCO}_3^-)$ :

$$(\text{CO}_3^{2-})_A = 0,94\text{Alk}_\Sigma 10^{-3} / (2 + a\text{H}^+ + y''(K^0(\text{HCO}_3^-) y')^{-1}), \quad (1)$$

$$(\text{HCO}_3^-)_A = 0,94\text{Alk}_\Sigma 10^{-3} - 2(\text{CO}_3^{2-})_A, \quad (2)$$

где 0,94 – коэффициент, учитывающий вклад карбонатной щелочности в общую щелочность для водных вытяжек (для почвенного раствора значение коэффициента 0,9) [45],  $y'$  – коэффициент активности однозарядной частицы (свободного иона или его ассоциата),  $y''$  – то же для двухзарядной частицы.

В водной вытяжке определяли трилонометрически водно-растворимую форму Ca в исходной и мелиорированной фосфогипсом почве. Водно-растворимую форму Sr получали методом атомно-абсорбционной спектроскопии для исходной почвы и фосфогипса. В мелиорированной почве водно-растворимую форму Sr определяли расчетным методом согласно исходному содержанию в почве и количеству Sr соответственно дозе внесения фосфогипса [70, 71] с учетом рекомендаций о пределе точности определения микроколичеств вещества в почве [58].

Статистическая оценка данных выполнена стандартным методом для малых выборок по показателю  $\text{HCP}_{05}$  [72].

Расчет равновесных концентраций и мольных долей свободных ионов и их ассоциатов выполняли путем решения системы уравнений материального баланса [37, 38, 41–48, 50, 51, 69]:

$$\begin{aligned} (\text{Ca}^{2+}) &= [\text{Ca}^{2+}] [1 + [\text{CO}_3^{2-}] [\text{K}(\text{CaCO}_3^0)]^{-1} + [\text{HCO}_3^-] [\text{K}(\text{CaHCO}_3^+)]^{-1} + [\text{SO}_4^{2-}] [\text{K}(\text{CaSO}_4^0)]^{-1}], \\ (\text{Mg}^{2+}) &= [\text{Mg}^{2+}] [1 + [\text{CO}_3^{2-}] [\text{K}(\text{MgCO}_3^0)]^{-1} + [\text{HCO}_3^-] [\text{K}(\text{MgHCO}_3^+)]^{-1} + [\text{SO}_4^{2-}] [\text{K}(\text{MgSO}_4^0)]^{-1}], \\ (\text{Sr}^{2+}) &= [\text{Sr}^{2+}] [1 + [\text{CO}_3^{2-}] [\text{K}(\text{SrCO}_3^0)]^{-1} + [\text{HCO}_3^-] [\text{K}(\text{SrHCO}_3^+)]^{-1} + [\text{SO}_4^{2-}] [\text{K}(\text{SrSO}_4^0)]^{-1}], \\ (\text{CO}_3^{2-}) &= [\text{CO}_3^{2-}] [1 + [\text{Ca}^{2+}] [\text{K}(\text{CaCO}_3^0)]^{-1} + [\text{Mg}^{2+}] [\text{K}(\text{MgCO}_3^0)]^{-1} + [\text{Sr}^{2+}] [\text{K}(\text{SrCO}_3^0)]^{-1} \\ &+ [\text{Na}^+] [\text{K}(\text{NaCO}_3^-)]^{-1}], \\ (\text{HCO}_3^-) &= [\text{HCO}_3^-] [1 + [\text{Ca}^{2+}] [\text{K}(\text{CaHCO}_3^+)]^{-1} + [\text{Mg}^{2+}] [\text{K}(\text{MgHCO}_3^+)]^{-1} + [\text{Sr}^{2+}] [\text{K}(\text{SrHCO}_3^+)]^{-1}], \\ (\text{SO}_4^{2-}) &= [\text{SO}_4^{2-}] [1 + [\text{Ca}^{2+}] [\text{K}(\text{CaSO}_4^0)]^{-1} + [\text{Mg}^{2+}] [\text{K}(\text{MgSO}_4^0)]^{-1} + [\text{Sr}^{2+}] [\text{K}(\text{SrSO}_4^0)]^{-1} \\ &+ [\text{Na}^+] [\text{K}(\text{NaSO}_4^-)]^{-1}], \end{aligned}$$

где  $(\text{Ca}^{2+})$ ,  $(\text{Mg}^{2+})$ ,  $(\text{Sr}^{2+})$ ,  $(\text{CO}_3^{2-})$ ,  $(\text{HCO}_3^-)$ ,  $(\text{SO}_4^{2-})$  – суммарные (общие) концентрации ионов, моль/л,  $[\text{Ca}^{2+}]$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$ ,  $[\text{Sr}^{2+}]$ ,  $[\text{Na}^+]$ ,  $[\text{SO}_4^{2-}]$ ,  $[\text{CO}_3^{2-}]$ ,  $[\text{HCO}_3^-]$  – равновесные концентрации свободных ионов, моль/л,  $\text{K}(\text{CaCO}_3^0)$ ,  $\text{K}(\text{CaHCO}_3^+)$ ,  $\text{K}(\text{CaSO}_4^0)$  и т.д. – концентрационные константы нестойкости ассоциатов.

Концентрационные константы нестойкости ассоциатов определяли делением термодинамической константы  $K^0$  на коэффициент активности  $y'$ ,  $y''$  для одно- и двухзарядных ионов и ионных пар соответственно.

Термодинамические значения констант равновесия приняты по Бьерруму [61]:

$$pK^0(\text{CaCO}_3) = 3,2; pK^0(\text{CaHCO}_3) = 1,26; pK^0(\text{CaSO}_4) = 2,31;$$

$$pK^0(\text{MgCO}_3) = 3,4; pK^0(\text{MgHCO}_3) = 1,16; pK^0(\text{MgSO}_4) = 2,36;$$

$$pK^0(\text{NaCO}_3) = 1,27; pK^0(\text{NaSO}_4) = 0,72.$$

Термодинамические константы нестойкости ассоциатов Sr определены по Спозито [60]:

$$pK^0(\text{SrCO}_3) = 2,94; pK^0(\text{SrHCO}_3) = 1,07; pK^0(\text{SrSO}_4) = 2,24.$$

Коэффициенты активности определяли по уравнению Дэвиса [61, 68]:

$$-\lg y = Az^2 \left( \frac{\sqrt{\mu^*}}{1 + \sqrt{\mu^*}} - 0,2\mu^* \right), \quad (3)$$

где коэффициент A зависит от температуры, при 25°C  $K = 0,5085$ ; z – заряд частицы (иона или ассоциата);  $\mu^*$  – эффективная ионная сила раствора, вычисленная по равновесным концентрациям форм существования ионов.

Термодинамические константы равновесия переводили в концентрационные с использованием коэффициентов активности ( $\gamma$ ) свободных ионов и ассоциатов [41, 50, 51, 73, 74]. После соответствующих преобразований получены окончательные уравнения материального баланса ионов в почвенном растворе чернозема обыкновенного, в которых концентрация ионов и термодинамические константы приведены в уравнениях (4–31) в численном виде соответственно дозам внесения фосфогипса 10, 20, 40 т/га.

В левой части уравнения (4–31) приведено общее содержание иона в водной вытяжке согласно системе уравнений материального баланса. Перед квадратными скобками в каждом из уравнений (4–31) приведены константы равновесия.

До внесения фосфогипса:

$$0,35 \cdot 10^{-3} = [\text{Ca}^{2+}](1 + 1132,381[\text{CO}_3^{2-}] + 15,369[\text{HCO}_3^-]^2 + 145,823[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (4)$$

$$0,10 \cdot 10^{-3} = [\text{Mg}^{2+}](1 + 1795,306[\text{CO}_3^{2-}] + 12,215[\text{HCO}_3^-] + 162,393[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (5)$$

$$0,724 \cdot 10^{-6} = [\text{Sr}^{2+}](1 + 620,255[\text{CO}_3^{2-}] + 9,854[\text{HCO}_3^-] + 125,027[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (6)$$

$$1,20 \cdot 10^{-5} = [\text{Na}^{2+}](1 + 15,741[\text{CO}_3^{2-}] + 4,449[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (7)$$

$$1,698 \cdot 10^{-6} = [\text{CO}_3^{2-}](1 + 1132,381[\text{Ca}^{2+}] + 1795,306[\text{Mg}^{2+}] + 620,255[\text{Sr}^{2+}] + 15,741[\text{Na}^{2+}]), \quad (8)$$

$$4,102 \cdot 10^{-4} = [\text{HCO}_3^-](1 + 15,369[\text{Ca}^{2+}] + 12,215[\text{Mg}^{2+}] + 9,854[\text{Sr}^{2+}]), \quad (9)$$

$$0,086 \cdot 10^{-3} = [\text{SO}_4^{2-}](1 + 145,823[\text{Ca}^{2+}] + 162,393[\text{Mg}^{2+}] + 125,027[\text{Sr}^{2+}] + 4,449[\text{Na}^{2+}]), \quad (10)$$

После внесения 10 т/га фосфогипса:

$$1,90 \cdot 10^{-3} = [\text{Ca}^{2+}](1 + 754,735[\text{CO}_3^{2-}] + 12,547[\text{HCO}_3^-]^2 + 97,191[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (11)$$

$$0,45 \cdot 10^{-3} = [\text{Mg}^{2+}](1 + 1196,573[\text{CO}_3^{2-}] + 9,973[\text{HCO}_3^-] + 108,236[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (12)$$

$$9,607 \cdot 10^{-6} = [\text{Sr}^{2+}](1 + 413,401[\text{CO}_3^{2-}] + 8,045[\text{HCO}_3^-] + 83,331[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (13)$$

$$1,30 \cdot 10^{-5} = [\text{Na}^{2+}](1 + 12,851[\text{CO}_3^{2-}] + 3,632[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (14)$$

$$1,217 \cdot 10^{-6} = [\text{CO}_3^{2-}](1 + 754,735[\text{Ca}^{2+}] + 1196,573[\text{Mg}^{2+}] + 413,401[\text{Sr}^{2+}] + 12,851[\text{Na}^{2+}]), \quad (15)$$

$$3,736 \cdot 10^{-4} = [\text{HCO}_3^-](1 + 12,547[\text{Ca}^{2+}] + 9,973[\text{Mg}^{2+}] + 8,045[\text{Sr}^{2+}]), \quad (16)$$

$$2,005 \cdot 10^{-3} = [\text{SO}_4^{2-}](1 + 97,191[\text{Ca}^{2+}] + 108,236[\text{Mg}^{2+}] + 83,331[\text{Sr}^{2+}] + 3,632[\text{Na}^{2+}]), \quad (17)$$

После внесения 20 т/га фосфогипса:

$$2,75 \cdot 10^{-3} = [\text{Ca}^{2+}](1 + 679,290[\text{CO}_3^{2-}] + 11,904[\text{HCO}_3^-]^2 + 87,476[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (18)$$

$$0,50 \cdot 10^{-3} = [\text{Mg}^{2+}](1 + 1076,965[\text{CO}_3^{2-}] + 9,461[\text{HCO}_3^-] + 97,416[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (19)$$

$$18,49 \cdot 10^{-6} = [\text{Sr}^{2+}](1 + 372,029[\text{CO}_3^{2-}] + 7,632[\text{HCO}_3^-] + 75,001[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (20)$$

$$1,30 \cdot 10^{-5} = [\text{Na}^{2+}](1 + 12,192[\text{CO}_3^{2-}] + 3,446[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (21)$$

$$0,856 \cdot 10^{-6} = [\text{CO}_3^{2-}](1 + 679,290[\text{Ca}^{2+}] + 1076,965[\text{Mg}^{2+}] + 372,029[\text{Sr}^{2+}] + 12,192[\text{Na}^{2+}]), \quad (22)$$

$$3,254 \cdot 10^{-4} = [\text{HCO}_3^-](1 + 11,904[\text{Ca}^{2+}] + 9,461[\text{Mg}^{2+}] + 7,632[\text{Sr}^{2+}]), \quad (23)$$

$$2,88 \cdot 10^{-3} = [\text{SO}_4^{2-}](1 + 87,476[\text{Ca}^{2+}] + 97,416[\text{Mg}^{2+}] + 75,001[\text{Sr}^{2+}] + 3,446[\text{Na}^{2+}]), \quad (24)$$

После внесения 40 т/га фосфогипса:

$$4,50 \cdot 10^{-3} = [\text{Ca}^{2+}](1 + 569,003[\text{CO}_3^{2-}] + 10,894[\text{HCO}_3^-]^2 + 73,274[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (25)$$

$$0,75 \cdot 10^{-3} = [\text{Mg}^{2+}](1 + 902,112[\text{CO}_3^{2-}] + 8,659[\text{HCO}_3^-] + 81,600[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (26)$$

$$36,26 \cdot 10^{-6} = [\text{Sr}^{2+}](1 + 311,667[\text{CO}_3^{2-}] + 6,985[\text{HCO}_3^-] + 62,824[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (27)$$

$$1,30 \cdot 10^{-5} = [\text{Na}^{2+}](1 + 11,158[\text{CO}_3^{2-}] + 3,154[\text{SO}_4^{2-}]), \quad (28)$$

$$0,990 \cdot 10^{-6} = [\text{CO}_3^{2-}](1 + 569,003[\text{Ca}^{2+}] + 902,112[\text{Mg}^{2+}] + 311,667[\text{Sr}^{2+}] + 11,158[\text{Na}^{2+}]), \quad (29)$$

$$3,364 \cdot 10^{-4} = [\text{HCO}_3^-](1 + 10,894[\text{Ca}^{2+}] + 8,659[\text{Mg}^{2+}] + 6,985[\text{Sr}^{2+}]), \quad (30)$$

$$4,925 \cdot 10^{-3} = [\text{SO}_4^{2-}](1 + 73,274[\text{Ca}^{2+}] + 81,600[\text{Mg}^{2+}] + 62,824[\text{Sr}^{2+}] + 3,154[\text{Na}^{2+}]), \quad (31)$$

Алгоритм расчета, представленный уравнениями (4–31), реализован методом последовательных приближений с использованием компьютерной программы «ION-2» [75, 76].

### Результаты и обсуждение

Содержание Ca и Sr в фосфогипсе Белореченского химкомбината представлено в таблице 1.

Таблица 1

**Валовое содержание и водно-растворимые формы Ca и Sr в фосфогипсе  
Белореченского химкомбината, г/кг**

Ca		Sr		Отношение общего содержания Ca/Sr		Отношение водно- растворимых форм Ca <sub>вр</sub> /Sr <sub>вр</sub>	
валовое содержание	водно- растворима я форма	валовое содержание	водно- растворима я форма	весовое	молярно е	весовое	молярно е
252,0	81,66	13,5	1,024	18,67	40,78	79,76	174,2

При внесении фосфогипса в результате ассоциации ионов значительно уменьшается концентрация их свободных форм и ионная сила раствора (табл. 2). При этом возрастают коэффициенты активности однозарядных ( $\gamma'$ ) и двухзарядных ( $\gamma''$ ) ионов. Концентрационные константы нестойкости ассоциатов и комплексов в почвенном растворе изменяются.

Таблица 2

**Равновесная концентрация, моль/л (сверху) и мольная доля, % (снизу)  
свободной формы главных ионов в водной вытяжке из чернозема  
обыкновенного**

Вариант опыта	Эффективная ионная сила, $\mu$ *	Коэффициент активности одно ( $\gamma'$ , сверху) и двухзарядных ( $\gamma''$ , снизу)	[Ca <sup>2+</sup> ]	[Mg <sup>2+</sup> ]	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	[Cl <sup>-</sup> ]	[Na <sup>+</sup> ]	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ]	[Sr <sup>2+</sup> ]	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]
			·10 <sup>-3</sup>	·10 <sup>-3</sup>	·10 <sup>-3</sup>	·10 <sup>-3</sup>	·10 <sup>-5</sup>	·10 <sup>-6</sup>	·10 <sup>-6</sup>	·10 <sup>-4</sup>
Исходная почва	0,001409	0,9586 0,8453	0,3434	0,0980	0,0807	0,30	1,1995	1,0846	0,7235	4,0756
			98,114	98,040	93,798	100,00	99,962	63,878	98,544	99,356
После внесения 10 т/га фосфогипса	0,007717	0,9114 0,6901	1,6277	0,3797	1,6708	0,30	1,292	0,453 0	8,409 8	3,6474
			85,668	84,382	83,330	100,00	99,397	37,223	87,538	97,628
После внесения 20 т/га фосфогипса	0,01039	0,8995 0,6547	2,2782	0,4067	2,3223	0,35	1,2827	0,2861	15,711	3,1559
			82,844	81,330	80,637	100,00	99,208	33,427	84,984	96,985
После внесения 40 т/га фосфогипса	0,01610	0,8798 0,5992	3,5158	0,5722	3,7705	0,30	1,2847	0,2808	29,260	3,2239
			78,129	76,293	76,559	100,00	98,823	28,364	80,696	95,835
НСР <sub>05</sub> , моль/л			0,20	0,12	0,25	0,09	0,31	0,43	0,61	0,84

Результат расчета показывает, что мольные доли ассоциатов кальция и магния близки между собой как до, так и после внесения фосфогипса. Они составляют от 1,9 до 21,9 % Ca<sup>2+</sup> и от 2,0 до 23,7 % Mg<sup>2+</sup>. Наибольшая степень связывания в ассоциаты наблюдается у анионов CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> – от 36,1 до 71,6 %. Степень связывания в ассоциаты иона Sr<sup>2+</sup> в исходной почве равна

1,5 %, а при внесении возрастающей дозы фосфогипса она резко увеличивается с 12,5 до 19,3 %. Меньше всего связываются в ассоциаты катионы  $\text{Na}^+$ , от 0,04 до 1,2%, а также анионы  $\text{HCO}_3^-$ , от 0,7 до 4,2 %.

Рассчитывали концентрационные отношения  $\text{Ca}/\text{Sr}$  валовых и  $\text{Ca}_{\text{вр}}/\text{Sr}_{\text{вр}}$  водно-растворимых форм в почвенном растворе до и после внесения в почву возрастающих доз фосфогипса (табл. 3).

Таблица 3

**Валовое содержание и водно-растворимые формы Ca и Sr в черноземе обыкновенном до и после внесения фосфогипса, г/кг**

Вариант опыта	Ca		Sr		Отношение общего содержания Ca/Sr		Отношение водно-растворимых форм $\text{Ca}_{\text{вр}}/\text{Sr}_{\text{вр}}$	
	валовое содержание	водно-растворимая форма	валовое содержание	водно-растворимая форма	весовое	Молярное	Весовое	Молярное
Исходная почва	42,720	0,0702	0,1780	$0,317 \cdot 10^{-3}$	240,0	524,3	221,4	482,6
После внесения 10 т/га фосфогипса	43,750	0,3809	0,2293	$4,208 \cdot 10^{-3}$	190,8	416,8	90,5	197,8
После внесения 20 т/га фосфогипса	44,707	0,5514	0,2806	$8,099 \cdot 10^{-3}$	159,3	348,0	68,1	148,8
После внесения 40 т/га фосфогипса	46,622	0,9022	0,3832	$15,882 \cdot 10^{-3}$	121,7	265,8	56,8	124,1

При внесении дозы фосфогипса, равной 3,8 г на 100 г почвы, содержание валового Ca в почве возрастает на 2,41 %, тогда как концентрация Sr увеличивается на 28,8 %. Содержание водно-растворимых форм Ca и Sr резко возрастает в 5,4 и 13,3 раз соответственно. Весовое соотношение валовых концентраций  $\text{Ca}/\text{Sr}$  снижается на 20,4 %. Уменьшение соотношения водно-растворимых форм  $\text{Ca}_{\text{вр}}/\text{Sr}_{\text{вр}}$  гораздо более существенно – в 2,5 раза.

Увеличение дозы фосфогипса с 10 до 40 т/га вызывает повышение валовой концентрации Ca на 6,6%, Sr на 67,1 %, отношение концентраций понижается – валовые на 36,2 %, водно-растворимые на 37,2 %. Для дозы 40 т/га соотношение  $\text{Ca}/\text{Sr}$  меньше 60. Дозы 10 и 20 т/га по весовому соотношению концентраций  $\text{Ca}/\text{Sr}$  валовых и водно-растворимые формы  $\text{Ca}_{\text{вр}}/\text{Sr}_{\text{вр}}$  являются экологически безопасными – расчетная величина соотношения

Расчетная активность  $\text{Sr}^{2+}$ , согласно данным таблицы 2, составляет в контрольном варианте 83,3 % (произведение коэффициента активности двухзарядного иона  $y''$  0,8453 на мольную долю, % свободной формы главных иона в водной вытяжке, 98,544), при дозе фосфогипса 10 т/га 60,4 % (произведение коэффициента активности двухзарядного иона  $y''$  0,6901 на мольную долю, % свободной формы главных иона в водной вытяжке, 87,538), при дозе фосфогипса 20 т/га 55,6 % (произведение коэффициента активности двухзарядного иона  $y''$  0,6547 на мольную долю, % свободной формы главных иона в водной вытяжке, 84,984), при дозе фосфогипса 40 т/га 48,4 % (произведение коэффициента активности двухзарядного иона  $y''$  0,5992 на мольную долю, % свободной формы главных иона в водной вытяжке, 80,696). Коэффициент активности  $\text{Sr}^{2+}$  в термодинамической системе водной

вытяжки при рассматриваемых дозах фосфогипса соответственно на 39,6, 44,4, 51,6 % ниже, чем в идеальном растворе.

Расчетная активность  $\text{Ca}^{2+}$  по мере увеличения дозы фосфогипса понижается в большей степени, соответственно, на 40,9, 43,8, 53,2 %. Это является термодинамическим объяснением повышения отношения молярных концентрация  $\text{Ca}/\text{Sr}$  в почве в связи с внесением фосфогипса.

Следует учитывать большую атомную массу  $\text{Sr}$ , что обуславливает меньшую степень ассоциации  $\text{Sr}^{2+}$  по сравнению с общей для всех двухзарядных ионов моделью активности. С учетом этого в дальнейшем возможно полнее характеризовать термодинамическое состояние  $\text{Sr}$  в почвенном растворе и точнее назначать дозу фосфогипса.

Расчет показывает, что в нашем исследовании количество легкорастворимых соединений  $\text{Sr}$  возрастает с 1,84 до 4,15 % при увеличении дозы фосфогипса с 10 до 40 т/га. При этом количество легкорастворимых соединений кальция возрастает с 0,872 до 1,935 %. Увеличение количества  $\text{Sr}$  является главной причиной того, что отношение водно-растворимых концентраций  $\text{Ca}/\text{Sr}$  в 2 раза ниже, чем отношение валовых концентраций [8, 27].

Следует отметить, что весовое отношение концентраций  $\text{Ca}/\text{Sr}$  не соответствует известным представлениям о природе химических взаимодействий в почве [39]. Предпочтительно молярное отношение  $\text{M}\text{Ca}^{2+}/\text{M}\text{Sr}^{2+}$  [39]. При принятом экологически допустимом весовом отношении  $\text{Ca}/\text{Sr}$  в почве 60, молярное отношение составит  $\text{M}\text{Ca}^{2+}/\text{M}\text{Sr}^{2+}=131$ . Коэффициент для пересчета значений из действующей формы представления отношения концентраций в предлагаемую форму составляет 2,18.

Зависимость отношения молярных концентраций  $\text{Ca}/\text{Sr}$  для валовых и водно-растворимых форм в почве от вносимой дозы фосфогипса представлена на рис. 1.



Рис. 1. Зависимость отношения молярных концентраций  $\text{M}\text{Ca}^{2+}/\text{M}\text{Sr}^{2+}$  в черноземе обыкновенном в растворе от дозы вносимого фосфогипса: 1 – отношение общего содержания  $\text{Ca}$  и  $\text{Sr}$ , 2 – отношение содержания водно-растворимых форм  $\text{Ca}_{\text{вр}}$  и  $\text{Sr}_{\text{вр}}$

Графическое представление показывает, что изменение отношений валовых форм имеет плавный характер. Для водно-растворимых форм кривая имеет гиперболический характер, в начале графика наблюдается резкое уменьшение отношения  $\text{Ca}/\text{Sr}$ , затем кривая становится более полой. Согласно рис. 1, предельно допустимая доза фосфогипса при максимально допустимом отношении водно-растворимых форм  $\text{Ca}$  и  $\text{Sr}$ , полученная путем интерполяции, составляет 34 т/га.

### Выводы

1. По результатам модельного эксперимента и математического моделирования термодинамического состояния  $\text{Sr}$  установлено, что внесение фосфогипса дозах 10, 20,



40 т/га в чернозем обыкновенный обуславливает возрастание эффективной ионной силы раствора в 5–10 раз, в результате ассоциации ионов в растворе термодинамический потенциал  $\text{Sr}^{2+}$  снижается. Активность  $\text{Sr}^{2+}$  при внесении дозы фосфогипса 10, 20, 40 т/га понижается соответственно на 40, 44 и 52 %. При этом расчетная активность  $\text{Ca}^{2+}$  понижается на 41, 44 и 53 %. Это является термодинамическим объяснением повышения отношения молярных концентрация  $\text{Ca}/\text{Sr}$  в почве в связи с внесением фосфогипса.

2. Исходя из минимально допустимого отношения молярных концентраций  $\text{M}\text{Ca}^{2+}/\text{M}\text{Sr}^{2+}=131$ , доза фосфогипса Белореченского химкомбината, вносимого в чернозем обыкновенный карбонатный, не должна превышать 34 т/га.

### Благодарности

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки Российской Федерации № 5.885.2014/К.

### Примечания:

1. Аканова Н.И. Фосфогипс нейтрализованный – перспективное агрохимическое средство интенсификации земледелия (по материалам семинаров ОАО «МХК» ЕвроХим) // Плодородие. 2013. №1. С. 2–7. <http://plodorodie-j.ru/journal/2013-2/nomer-11/n60.html>

2. Белюченко И.С., Петренко Д.В. Содержание стронция по профилю различных почв в районе предприятия по производству фосфорных удобрений (на примере ОАО «Еврохим-БМУ», г. Белореченск) // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 35. С. 123–128.

3. Kalinichenko Valery P., Starcev Victor F. Recycling of poultry litter by method of Biogeosystem technique // International Journal of Environment Problems. 2015. Vol. (1). Is. 1. pp. 17–48. DOI: 10.13187/ijep.2015.1.17

4. Müller M.N., Lebrato M., Riebesell U., Barcelose Ramos J., Schulz K.G., Blanco-Ameijeiras S., Sett S., Eisenhauer A., Stoll H.M. Influence of temperature and  $\text{CO}_2$  on the strontium and magnesium composition of coccolithophore calcite // Biogeosciences. 11. Volume 11. Number 4. 2014. pp 1065–1075, 2014. [www.biogeosciences.net/11/1065/2014/](http://www.biogeosciences.net/11/1065/2014/) doi:10.5194/bg-11-1065-2014.

5. Nicholson, D. and N. Quirke Ion pairing in confined electrolytes. Preliminary Communication // Molecular Simulation. 2003. 29: 287–290. DOI: 10.1080/0892702031000078427

6. Рекомендации по использованию фосфогипса для мелиорации солонцов / Под ред. И.Н. Любимовой. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2006. 46 с.

7. Любимова И.Н., Борисочкина Т.И. Влияние потенциально-опасных химических элементов, содержащихся в фосфогипсе, на окружающую среду. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2007. 45 с.

8. Ковальский В.В. Геохимическая экология. Москва: Наука, 1974. 299 с.

9. Кларковое число [https://ru.wikipedia.org/wiki/Кларковое\\_число](https://ru.wikipedia.org/wiki/Кларковое_число).

10. Виноградов А.П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре. // Геохимия. 1956. № 1. С. 6–52.

11. Агрохимия <http://openacc.ru/tyazhelye-metally/781-soderzhanie-bariya-i-stronciya-v-pochve.html>

12. Потатуева Ю.А., Сидоренкова Н.К., Прищеп Е.Г. Агроэкологическое значение примесей тяжелых металлов и токсичных элементов в удобрениях // Агрохимия. 2002. № 1. С. 85–95.

13. Minkina T., Samokhin A., Nazarenko O. Influence of soil contamination by heavy metals on organic matter // Man and soil at the third millennium. Proceedings of third Internat. Congress of the ESSC. Valencia (Spain), 2002. V.2. pp. 1859–1865.

14. Быстрицкая Т.Л. Генезис слитых почв долин среднего течения рек Урала и Кубани. Автореф дис ... канд биол наук. Москва, 1993. <http://www.referun.com/n/genezis-slityh-pochv-dolin-srednego-techeniya-rek-urala-i-kubani>

15. Власенко В.П. Гидрометаморфизм почв Северо-Западного Кавказа при их сельскохозяйственном использовании. Автореф дис ... докт с.-х. наук. Краснодар, 2012.
16. Полевой определитель почв. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с. [http://soils.narod.ru/download/field\\_guide\\_int.pdf](http://soils.narod.ru/download/field_guide_int.pdf)
17. Хаджинов Н.И. Химическая мелиорация солонцовых и солонцевато-слитых почв южной части Ставропольской возвышенности. Автореф дисс ... канд с.-х. наук. Москва, 1987. <http://earthpapers.net/himicheskaya-melioratsiya-solontsovyh-i-solontsevato-slityh-pochv-yuzhnoy-chasti-stavropolskoj-vozvyshehnosti>
18. Березин Л.В. Экологические проблемы использования мелиорированных земель в Западной Сибири // Мелиорация и водное хозяйство. 2005. №6. С. 56–58.
19. Березин Л.В., Сапаров А.С., Канн В.М., Шаяхметов М.Р. Технология комплексной мелиорации экосистем России и Казахстана. Алматы-Омск, 2013. 215 с.
20. Вавилова Е.В., Любимова И.Н. Стронций в мелиорируемых фосфогипсом почвах солонцовых комплексов // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 1997. № 4. С. 38.
21. Имгрунт И.И. Влияние приемов повышения плодородия почвы на урожай зерна кукурузы / Агроэкология Северо-Западного Кавказа: проблемы и перспективы. Белореченск: ООО «Эльбрус», 2004. С. 65–72.
22. Мищенко Н.А., Громько Е.В., Калинин В.П., Черненко В.В., Ларин С.В. Эколого-рекреационный рециклинг фосфогипса в черноземе на примере Краснодарского края // Плодородие. 2009. № 6. С. 25–26.
23. Петренко Д.В., Белюченко И.С. Влияние отходов Белореченского химзавода на содержание Sr в окружающих ландшафтах // Экологический вестник Северного Кавказа. 2012. Т.8. № 1. С. 4–79.
24. Семендяева Н.В. Теоретические и практические аспекты химической мелиорации солонцов Западной Сибири. Новосибирск, 2005. 154 с.
25. Скуратов Н.С. и др. Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель. Новочеркасск, 2000. 86 с.
26. Хусаинов А.Т., Сарсенова А.А., Султанова М.Д. Эколого-токсикологическая оценка и регламентация доз внесения фосфогипса на солонцах по содержанию тяжелых металлов // Развитие идей почвозащитного земледелия в новых социо-экономических условиях: Мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 90 летию со дня рождения академика А.И. Бараева. Шортанды, 2004. С. 359–362.
27. Калинин В.П., Ендовицкий А.П., Зармаев А.А., Батукаев А.А., Бакоев С.Ю., Зинченко А.В. Педогенетическое обоснование технических средств управления вещественным составом дисперсной системы почвы // Вестник Чеченского государственного университета. 2014. № 1. С. 187–196.
28. Батукаев А.А., Москаленко А.П., Овчинников В.Н., Калинин В.П., Москаленко С.А., Дикаев З.С. Экологическая политика и экологическая экономика на основе биогеосистемотехники. // Проблемы развития АПК региона. 2014 год. Т. 17. №1(17). С. 23–27.
29. Лернер Л.А., Любимова И.Н., Каханович З.Н., Грачев А.А. Атомно-абсорбционное определение Sr в фосфогипсах и почвах в модельных опытах для оценки возможности загрязнения почв // Почвоведение. 1984. № 2. С. 142–148.
30. Бакоев С.Ю., Мищенко Н.А., Ендовицкий А.П., Калинин В.П. Термодинамическое обоснование рециклинга фосфогипса в черноземе // Плодородие. 2010. № 1. С. 11–13.
31. Калинин В.П. Патент на изобретение RU № 2387115 С2. Устройство для внесения вещества при ротационном внутрипочвенном рыхлении. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 апреля 2010 г. Патентообладатель ИППЮР. Заявка № 2008124500/12(029710) от 16.06.2008. Опубликовано 27.04.2010. Бюл. № 12. 6 с.
32. Калинин В.П., Ильин В.Б., Ендовицкий А.П., Черненко В.В. Патент на изобретение RU № 2476055 С2. Способ синтеза вещества внутри тонкодисперсной системы. Патентообладатель: ООО Структура К°. МПК Кл. А01С 23/00 (2006.01). Заявка № 2011100187/21(000278) от 11.01.2011. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 февраля 2013 г. Опубликовано 27.02.2013. Бюл. №6.

33. Матишов Г.Г., Калиниченко В.П., Шаршак В.К., Илларионов В.В., Ладан Е.П., Генева Е.Д., Мищенко Н.А., Ендовицкий А.П., Черненко В.В., Суковатов В.А., Ильина Л.П., Зинченко А.В. Патент на изобретение RU №2438293 С1. Способ долговременного управления продуктивностью степных биogeосистем юга России. МПК А01В 13/14 (2010.01) А01В 39/08 (2010.01). Патентообладатели: Учреждение Российской Академии наук Южный научный центр РАН. Институт плодородия почв юга России. Заявка 2010116534/20(023500) от 26.04.2010. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 января 2012 г. Опубликовано 10.01.2012. Бюл. №1.

34. Минкина Т.М., Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Федоров Ю.А. Карбонатно-кальциевое равновесие в системе вода-почва. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2012. 376 с.

35. Радевич Е.В., Калиниченко В.П. Свойства темно-каштановых почв солонцового комплекса при химической мелиорации фосфогипсом // Плодородие. 2010. № 3. С. 29–30.

36. Endovitsky Anatoly P., Kalinichenko Valery P., Minkina Tatiana M. Carbonate Calcium Equilibrium in Soil Solution as a Driver of Heavy Metals Mobility // International Journal of Environment Problems. 2015. Vol. (2). Is. 2. pp. 136-153. DOI: 10.13187/ijep.2015.2.136 www.ejournal33.com

37. Kalinitchenko V.P., Batukaev A.A., Zarmaev A.A., Minkina T.M., Starcev V.F., Dikaev Z.S., Magomadov A.S., Jusupov V.U. Biogeosystem technique as a contribution to global food sustainability // 248th ACS National Meeting & Exposition. 13<sup>TH</sup> IUPAC International Congress Of Pesticide Chemistry. Crop, Environment, and Public Health Protection. Technologies for a Changing World. Co-sponsored by IUPAC and ACS-AGRO. August 10-14, 2014. San Francisco, California, USA. Abstracts. AGRO 143. P. 37.

38. Kalinitchenko V.P., Batukaev A.A., Zinchenko V.E., Zarmaev A.A., Magomadov A.S., Chernenko V.V., Startsev V.F., Bakoev S.U., Dikaev Z.S. Biogeosystem technique as a method to overcome the Biological and Environmental Hazards of modern Agricultural, Irrigational and Technological Activities // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. Vienna, 2014. DOI: Vol. 16, EGU2014-17015

39. Ильина Л.П., Суковатов В.А., Черненко В.В., Калиниченко В.П. Перспективные способы мелиорации комплексных солонцовых почв юго-востока Ростовской области // Вестник южного научного центра РАН. 2008. Т. 4. № 2. С. 69–77.

40. Окорков В.В. Химическая мелиорация солонцов в Казахстане // Земледелие. 1991. № 10. С. 46–48.

41. Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Ильин В.Б., Иваненко А.А. Коэффициенты ассоциации и активность ионов кадмия и свинца в почвенных растворах // Почвоведение. 2009. № 2. С. 218–225.

42. Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Ильин В.Б., Иваненко А.А. Термодинамическое состояние кадмия и свинца в почвах каштаново-солонцового комплекса // Агрoхимия. 2008. № 9. С. 59–65.

43. Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Иваненко А.А., Мищенко Н.А. Влияние мелиорации фосфогипсом на состояние свинца и кадмия в черноземах // Агрoхимия. 2011. № 10. С. 58–69.

44. Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Минкина Т.М. Состояние свинца и кадмия в черноземе после внесения фосфогипса // Почвоведение. 2014. № 3. С. 340–350. DOI: 10.7868/S0032180X14030058

45. Минкин М.Б., Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П. Карбонатно-кальциевое равновесие в почвенных растворах. М.: МСХА, 1995. 210 с.

46. Минкин М.Б., Ендовицкий А.П., Левченко В.М. Ассоциация ионов в почвенных растворах // Почвоведение. 1977. № 2. С. 49–58.

47. Минкин М.Б., Камынина Л.М., Манахина А.А., Ендовицкий А.П. Влияние органического вещества на карбонатно-кальциевое равновесие в водных вытяжках из солончаковатых солонцов // Изв. Северо-Кавказского научного центра высшей школы. 1979. № 4. С. 90–94.

48. Минкин М.Б., Горбунов Н.И., Садименко П.А. Актуальные вопросы физической и коллоидной химии почв. Ростов-на-Дону: РГУ, 1982. 280 с.

49. Суковатов В.А., Черненко В.В., Калиниченко В.П. Свойства солонцовых почв при различных способах мелиорации // Плодородие. 2008. № 5 (44). С. 33–35.
50. Batukaev, A.A., Endovitsky A.P., Minkina T.M., Kalinichenko V.P., Dikaev Z.S., Sushkova S.N. Chemical equilibrium of soil solution in steppe zone soil // American Journal of Agricultural and Biological Sciences 9 (3): 420–429, 2014. DOI:10.3844/ajabssp. 2014. 420.429 Published Online 9 (3) 2014 (<http://www.thescipub.com/ajabs.toc>)
51. Endovitsky A.P., Minkina T.M. Kalinichenko V.P., Batukaev A.A., Dikaev Z.S., Sushkova S.N. The association of ions in the soil solution of saline soils // American Journal of Agricultural and Biological Sciences 9 (2): 238–244, 2014. ISSN: 1557-4989. ©2014 Science Publication. doi:10.3844/ajabssp.2014.238.244 Published Online 9 (2) 2014 (<http://www.thescipub.com/ajabs.toc>)
52. Minkin M.B., Yendovitsky A.P. Conditions for the formation of the chemical composition of soil solutions // XIII Congress of the International Society of Soil Science (Hamburg, 13-20.8.1986). Hamburg, 1986. V. 11. pp. 396–397.
53. Minkin M.B., Yendovitsky A.P., Andreyev A.G. Role of associate-ionic and protonic equilibria in the formation of the chemical composition of soil solutions // Advances in soil science. Soviet pedologists to the XIII-th International Congress of Soil Science. М.: Nauka, 1986. pp. 34–40.
54. Мигуцкий А.С., Парфенов А.И. Мелиорация солонцовых почв лесостепи Западной Сибири // Тезисы докладов VI съезд Всесоюзного общества почвоведов / Грузинский НИИ почвоведения, агрохимии, и мелиорации. Тбилиси, 1981. Кн. 5. С. 110-111.
55. Минеев В.Г. Химизация земледелия и природная сфера. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.
56. Glazko Valery I., Galzko Tatiana T. Conflicts of Biosphere and Agroecosystems // International Journal of Environment Problems. 2015. Vol. (1). Is. 1. pp. 4–16. DOI: 10.13187/ijep.2015.1.4 [www.ejournal33.com](http://www.ejournal33.com)
57. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А.Д. Семенова. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
58. Soil Guideline Values. Science Report SC050021/SGV. Bristol: Environment Agency, 2009. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/313899/SCHO0709BQRO-e-e.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/313899/SCHO0709BQRO-e-e.pdf)
59. Soil Sampling and Methods of Analysis. 2008. Second Edition. Edited by M.R. Carter and E.G. Gregorich. Canadian Society of Soil Science. Taylor & Francis Group, LLC. [http://www.planta.cn/forum/files\\_planta/methods\\_of\\_analysis\\_212.pdf](http://www.planta.cn/forum/files_planta/methods_of_analysis_212.pdf)
60. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1992. 399 с.
61. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1979. 480 с.
62. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Самохин А.П., Статовой А.А. Поглощение меди, цинка и свинца черноземом обыкновенным при моно- и полиэлементном загрязнении // Агрохимия. 2005. № 8. С. 58–64.
63. Резников А.А., Шапошник В.А. Компьютерное моделирование образования ионных пар в растворе электролита // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2005. № 2. С. 65–68.
64. Сборник санитарно-гигиенических нормативов и методов контроля вредных веществ в объектах окружающей среды. М., 1991.
65. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Бауэр Т.В., Сушкова С.Н., Кушнарера А.В. Влияние сопутствующего аниона на баланс катионов в системе почва-раствор (на примере чернозема обыкновенного) // Почвоведение. 2014. № 8. С. 932–940. DOI: 10.7868/S0032180X14080103
66. Sposito Garrison. The Future of an Illusion: Ion Activities in Soil Solutions, Soil Science Society of America Journal 48: 531–536, 1984. doi:10.2136/sssaj1984.03615995004800030012x
67. Bjerrum J., Schwarzenbach G., Sillen L.G., Sykes K.W. Stability constants of metal-ion complexes with solubility products of inorganic substances. Part II. Inorganic ligands. London: The Chemical Society, 1958. 131 p. <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/210262>
68. Davies C.W. Ion association. London: Butterworths Sci. Publ., 1962. 190 p. <http://www.sciencemag.org/content/143/3601/37>

69. Lisetskii F.N., Pavlyuk Ya.V., Kirilenko Zh.A. and Pichura V.I. Basin organization of nature management for solving hydroecological problems // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. Vol. 39. №. 8. pp. 550–557. DOI: 10.3103/S106837391408007X
70. Методические указания по определению валового содержания стронция и кальция в почвах. М., ЦИНАО. 1999.
71. Теория и практика химического анализа почв / Ред. Л.А. Воробьева. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
72. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во МГУ, 1995. 320 с.
73. Amakor X.N., Jacobson A.R., Cardon G.E. Improving estimates of soil salinity from saturation paste extracts in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 2013. 3: 792–799. DOI: 10.2136/sssaj2012.0235.
74. Chialvo A.A., Cummings P.T., Cochran H.D., Simonson J.M., Mesmer R.E. Na<sup>+</sup>–Cl<sup>-</sup> ion pair association in supercritical water // J. Chem. Phys. 1 December 1995. V. 103. Issue 21. pp. 9125–9516. <http://dx.doi.org/10.1063/1.470707>
75. Бакоев С.Ю., Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Иваненко А.А. Компьютерная программа ION-2 для расчета ассоциат-ионного равновесия в почвенном растворе // Плодородие. 2009. № 6. С. 22–23.
76. Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Бакоев С.Ю., Иваненко А.А., Суковатов В.А., Радевич Е.В. Программа для ЭВМ «ION-2». Свидетельство о государственной регистрации: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 27.04.2009.

#### References:

1. Akanova NI Neutralized phosphogypsum – a promising agrochemical for intensive agriculture (based on seminars of "MCC" EuroChem) // Fertility. 2013. №1. pp. 2–7. <http://plodorodie-j.ru/journal/2013-2/nomer-11/n60.html> (in Russian)
2. Belyuchenko IS, DV Petrenko The content of strontium in the profile of different soils in the area of enterprise for the production of phosphate fertilizers (by the example of "Eurochem-BMU", Belorechensk) // Proceedings of the Kuban State Agrarian University. 2012. № 35. pp. 123–128. (in Russian)
3. Kalinichenko Valery P., Starcev Victor F. Recycling of poultry litter by method of Biogeosystem technique // International Journal of Environment Problems. 2015. Vol. (1). Is. 1. pp. 17–48. DOI: 10.13187/ijep.2015.1.17 (in Russian)
4. Müller M.N., Lebrato M., Riebesell U., Barcelose Ramos J., Schulz K.G., Blanco-Ameijeiras S., Sett S., Eisenhauer A., Stoll H.M. Influence of temperature and CO<sub>2</sub> on the strontium and magnesium composition of coccolithophore calcite // Biogeosciences. 2014. Volume 11. Number 4. pp 1065–1075, [www.biogeosciences.net/11/1065/2014/](http://www.biogeosciences.net/11/1065/2014/) doi:10.5194/bg-11-1065-1075, 2014.
5. Nicholson, D. and N. Quirke Ion pairing in confined electrolytes. Preliminary Communication // Molecular Simulation. 2003. 29: 287–290. DOI: 10.1080/0892702031000078427
6. Recommendations for the use of phosphogypsum for melioration of solonetz / Ed. IN Lyubimova. М.: Soil. Inst VV Dokuchaev, 2006. 46 p. (in Russian)
7. Lyubimova IN, Borisochkina TI Effect of potentially hazardous chemicals contained in phosphogypsum on environment. М.: Soil Inst. VV Dokuchaev, 2007. 45 p. (in Russian)
8. Kowalsky V. Geochemical ecology. Moscow: Science, 1974. 299 pp. (in Russian)
9. Clark [https://ru.wikipedia.org/wiki/Кларковое\\_число](https://ru.wikipedia.org/wiki/Кларковое_число).
10. Vinogradov AP Laws of distribution of chemical elements in the earth's crust // Geochemistry. 1956. № 1. pp. 6–52. (in Russian)
11. Agrochemistry <http://openacc.ru/tyazhelye-metally/781-soderzhanie-bariya-i-stronciya-v-pochve.html> (in Russian)
12. Potatueva YA, Sidorenkova NK, Prishchep EG Agroecological value of impurities of heavy metals and toxic elements in fertilizers // Agrochemistry. 2002. № 1. pp. 85–95. (in Russian)

13. Minkina T., Samokhin A., Nazarenko O. Influence of soil contamination by heavy metals on organic matter // *Man and soil at the third millennium. Proceedings of third Internat. Congress of the ESSC. Valencia (Spain), 2002. V.2. pp. 1859–1865.*
14. Bystritskaya TL The genesis of coalescent soils of the valleys of the middle reaches of the rivers Ural and Kuban. Abstract Dis ... candidate of Biol Sciences. Moscow, 1993. <http://www.referun.com/n/genezis-slityh-pochv-dolin-srednego-techeniya-rek-urala-i-kubani> (in Russian)
15. Vlasenko VP Hydrometamorphism of soils of North-West Caucasus at agricultural use. Abstract Diss ... Doc Agric Sciences. Krasnodar. 2012. (in Russian)
16. Field guide of soils. M.: Soil Inst VV Dokuchaev, 2008. 182 p. [http://soils.narod.ru/download/field\\_guide\\_int.pdf](http://soils.narod.ru/download/field_guide_int.pdf) (in Russian)
17. Khadzhinov NI Chemical reclamation of alkaline solonetzic and solonetzic-coalescent soil of southern part of Stavropol Height. Abstract Diss ... Candidate of Agric Sciences. Moscow, 1987. <http://earthpapers.net/himicheskaya-melioratsiya-solontsovyh-i-solontsevat-slityh-pochv-yuzhnoy-chasti-stavropolskoy-vozvysheynosti> (in Russian)
18. Berezin LV Environmental problems of meliorated lands use in Western Siberia // *Irrigation and Water Management. 2005. №6. pp. 56–58.* (in Russian)
19. Berezin LV, Saparov AS, Cann VM, Shayakhmetov MR Technology of complex reclamation of ecosystems of Russia and Kazakhstan. Almaty – Omsk, 2013. 215 pp. (in Russian)
20. Vavilova EV, Lyubimova IN Strontium in phosphogypsum reclaimed alkaline soil complexes // *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 1997. № 4. pp. 38.* (in Russian)
21. Imgrunt II Influence of methods of fertility increasing of soil on harvest of corn / *Agroecology of Northwestern Caucasus: problems and prospects. Belorechensk: OOO "Elbrus", 2004. pp. 65–72.* (in Russian)
22. Mishchenko NA, Gromyko EV Kalinichenko VP, Chernenko VV, Larin SV Ecological and recreational phosphogypsum recycling in chernozem on example of the Krasnodar Territory // *Fertility. 2009. № 6. pp. 25–26.* (in Russian)
23. Petrenko DV, Belyuchenko IS Influence of Belorechensk chemical plant waste on the content of Sr in the surrounding landscape // *Ecological Bulletin of the North Caucasus. 2012. V. 8. № 1. pp. 4–79.* (in Russian)
24. Semendiayeva NV Theoretical and practical aspects of chemical reclamation of solonetz of Western Siberia. Novosibirsk, 2005. 154 pp. (in Russian)
25. Skuratov NS et al. Guidelines for the control and regulation of irrigated soil fertility. Novocherkassk, 2000. 86 p. (in Russian)
26. Husainov AT, Sarsenova AA, Sultanov MD Ecological and toxicological assessment and regulation of application dose of phosphogypsum to solonetz on of heavy metals content // *Development of ideas of conservation agriculture in the new socio-economic conditions: Mat. Intern. scientific and practical. Conf. on 90<sup>th</sup> Anniversary of Academician AI Barayev. Shortandy, 2004. pp 359-362.* (in Russian)
27. Kalinichenko VP, Endovitsky AP, Zarmaev AA, Batukaev AA, Bakoev SY, Zinchenko AV Pedogenetic justification of technical means for the soil disperse systems material composition control // *Bulletin of the Chechen State University. 2014. № 1. pp. 187–196.*
28. Batukaev AA, Moskalenko AP Ovchinnikov VN, Kalinichenko VP, Moskalenko SA, Dikaev ZS. Environmental policy and environmental economics based on Biogeosystem technique. // *Problems of development of agribusiness in the region. 2014. Number 1 (17). pp. 23–27.* (in Russian)
29. Lerner LA, Lyubimova IN, Kahanovich ZN, Grachev AA Atomic absorption determination of Sr in phosphogypsum and soil in model experiments to assess the possibility of soil contamination // *Soil Science. 1984. № 2. pp. 142–148.* (in Russian)
30. Bakoev SY, Mishchenko NA, Endovitsky AP, Kalinichenko V.P. Thermodynamic substantiation of the recycling of phosphogypsum in blacksoil // *Fertility. 2010. № 1. pp. 11–13.* (in Russian)

31. Rotating cultivator for under-humus soil layer. Geneva. Switzerland. The international Bureau of WIPO. Geneva. Switzerland. Patent cooperation treaty WO 2005/099427 A1. International application: PCT RU/2005/000195. Classification of subject matter: A01B 13/08, 13/16, 49/02. International filing date: 15 April 2005 (15.04.2005). International publication date: 27 October 2005 (27.10.2005). Priority date: 2004111564 16 April 2004 (16.04.2004) RU. Applicant: Institut Plodorodiya Pochv Uga Rossii (IPPYUR). Inventor: V. Kalinichenko.
32. Kalinichenko VP, Il'in VB, Endovitsky AP, Chernenko VV The patent for the invention RU № 2476055 C2. A method of synthesizing matter within the soil fine system. Patentee LLC Structure K°. IPC Cl. A01C 23/00 (2006.01). Application № 2011100187/21 (000278) on 11.01.2011. Registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation February 27, 2013. Posted 02.27.2013. Bull. №6. (in Russian)
33. Matishov G.G., Kalinichenko V.P., Sharshakov V.K., Illarionov V.V., Ladan E.P., Geney E.D., Mishchenko N.A., Endovickii A.P., Chernenko V.V., Sukovatov V.A., Ilyina L.P., A.V. Zinchenko. Patent RU № 2438293. Method of long-term productivity management of steppes biogeosystem of southern Russia. IPC A01B 13/14 (2010.01) A01V 39/08 (2010.01) . Patentees: Southern Scientific Center Institution of the Russian Academy of Sciences, Institute of Soil Fertility of South Russia. Application 2010116534 / 20 (023500) on 26.04.2010 . Registered 10.01.2012 Bull. Number 1. (in Russian)
34. Minkina TM, Endovitsky AP, Kalinichenko VP, Fedorov Y. Calcium carbonate equilibrium in the water-soil system. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2012. 376 p. (in Russian)
35. Radevich EV, Kalinichenko VP The properties of dark chestnut solonetz complex soils at chemical amelioration with phosphogypsum // Fertility. 2010. № 3. pp. 29–30. (in Russian)
36. Endovitsky Anatoly P., Kalinichenko Valery P., Minkina Tatiana M. Carbonate Calcium Equilibrium in Soil Solution as a Driver of Heavy Metals Mobility // International Journal of Environment Problems. 2015. Vol. (2). Is. 2. pp. 136–153. DOI: 10.13187/ijep.2015.2.136 www.ejournal33.com (in Russian)
37. Kalinichenko V.P., Batukaev A.A., Zarmaev A.A., Minkina T.M., Starcev V.F., Dikaev Z.S., Magomadov A.S., Jusupov V.U. Biogeosystem technique as a contribution to global food sustainability // 248th ACS National Meeting & Exposition. 13<sup>TH</sup> IUPAC International Congress Of Pesticide Chemistry. Crop, Environment, and Public Health Protection. Technologies for a Changing World. Co-sponsored by IUPAC and ACS-AGRO. August 10-14, 2014. San Francisco, California, USA. Abstracts. AGRO 143. P. 37.
38. Kalinichenko V.P., Batukaev A.A., Zinchenko V.E., Zarmaev A.A., Magomadov A.S., Chernenko V.V., Startsev V.F., Bakoev S.U., Dikaev Z.S. Biogeosystem technique as a method to overcome the Biological and Environmental Hazards of modern Agricultural, Irrigational and Technological Activities // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. Vienna, 2014. DOI: Vol. 16, EGU2014-17015
39. Ilyina LP Sukovatov VA, Chernenko VV, Kalinichenko VP. Advanced methods of complex reclamation of alkaline soils of the southeast of Rostov region // Herald of the Southern Scientific Center of RAS. 2008. V. 4. № 2. pp. 69–77. (in Russian)
40. Okorkov VV Chemical reclamation of solonetz in Kazakhstan // Agriculture. 1991. № 10. pp. 46–48. (in Russian)
41. Endovitsky AP Kalinichenko VP, Ilyin VB, Ivanenko AA Coefficients of association and activity of ions of cadmium and lead in soil solution // Soil Science. 2009. № 2. pp. 218–225. (in Russian)
42. Endovitsky AP, Kalinichenko VP, Ilyin VB, Ivanenko AA Thermodynamic state of cadmium and lead in the soils of chestnut solonetz complex // Agrochemistry. 2008. № 9. pp. 59–65. (in Russian)
43. Endovitsky AP, Kalinichenko VP, Ivanenko AA, NA Mishchenko Influence of soil reclamation with phosphogypsum on the state of lead and cadmium in chernozem // Agrochemistry. 2011. № 10. pp. 58–69. (in Russian)
44. Endovitsky AP Kalinichenko VP, Minkina TM State of lead and cadmium in chernozem after making phosphogypsum // Soil Science. 2014. № 3. pp. 340–350, DOI: 10.7868/S0032180X14030058 (in Russian)

45. Minkin M.B., Endovitsky A.P., Kalinichenko V.P. Carbonate-calcium equilibrium in the soil solution. Moscow: Publishing House of the ICCA, 1995. 210 p. (in Russian)
46. Minkin M.B., Endovitsky A.P. Levchenko V.M. Association of Ions in Soil Solutions // Soil Science. 1977. №2. pp. 49–58. (in Russian)
47. Minkin M.B., Kamynina L.M. Manikhina A.A. Endovitsky A.P. The influence of organic matter on calcium carbonate equilibrium in water extracts from solonchak solonetzic soils // Proceedings. North-Caucasus Scientific Center of Higher School. Natural sciences. 1979. No. 4. pp. 90–94. (in Russian)
48. Minkin Mikhail, Gorbunov NI, Sadimenko PA Topical issues of physical and colloid chemistry of soils. Rostov-on-Don: Rostov State University, 1982. 280 pp. (in Russian)
49. Sukovatov VA, Chernenko VV, Kalinichenko VP Properties of alkaline soils at different methods of reclamation // Fertility. 2008. № 5 (44). pp. 33–35. (in Russian)
50. Batukaev, A.A., Endovitsky A.P., Minkina T.M., Kalinichenko V.P., Dikaev Z.S., Sushkova S.N. Chemical equilibrium of soil solution in steppe zone soil // American Journal of Agricultural and Biological Sciences 9 (3): 420–429, 2014. DOI:10.3844/ajabssp. 2014. 420.429 Published Online 9 (3) 2014 (<http://www.thescipub.com/ajabs.toc>)
51. Endovitsky A.P., Minkina T.M. Kalinichenko V.P., Batukaev A.A., Dikaev Z.S., Sushkova S.N. The association of ions in the soil solution of saline soils // American Journal of Agricultural and Biological Sciences 9 (2): 238-244, 2014. ISSN: 1557-4989. ©2014 Science Publication. doi:10.3844/ajabssp.2014.238.244 Published Online 9 (2) 2014 (<http://www.thescipub.com/ajabs.toc>)
52. Minkin M.B., Yendovitsky A.P. Conditions for the formation of the chemical composition of soil solutions // XIII Congress of the International Society of Soil Science (Hamburg, 13-20.8.1986). Hamburg, 1986. V. 11. pp. 396–397.
53. Minkin M.B., Yendovitsky A.P., Andreyev A.G. Role of associate-ionic and protonic equilibria in the formation of the chemical composition of soil solutions // Advances in soil science. Soviet pedologists to the XIII-th International Congress of Soil Science. M.: Nauka, 1986. pp. 34–40.
54. Migutsky AS, AI Parfenov Reclamation of alkaline soils of forest-steppe of Western Siberia // Abstracts of the VI Congress of the All-Union Society of Soil Science / Georgian Research Institute of Soil Science, Agrochemistry and Land Reclamation. Tbilisi, 1981. Book. 5. pp. 110–111. (in Russian)
55. Mineev VG Chemisation of agriculture and natural spheres. M.: Agropromizdat, 1990. 287 pp. (in Russian)
56. Glazko Valery I., Galzko Tatiana T. Conflicts of Biosphere and Agroecosystems // International Journal of Environment Problems. 2015. Vol. (1). Is. 1. pp. 4–16. DOI: 10.13187/ijep.2015.1.4 [www.ejournal33.com](http://www.ejournal33.com) (in Russian)
57. Guidance on chemical analysis of dry land surface waters / Edited A.D. Semenov. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 541 pp. (in Russian)
58. Soil Guideline Values. Science Report SC050021/SGV. Bristol: Environment Agency, 2009. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/313899/SCH00709BQRO-e-e.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/313899/SCH00709BQRO-e-e.pdf)
59. Soil Sampling and Methods of Analysis. Second Edition. Edited by M.R. Carter and E.G. Gregorich. Canadian Society of Soil Science. Taylor & Francis Group, LLC, 2008. [http://www.planta.cn/forum/files\\_planta/methods\\_of\\_analysis\\_212.pdf](http://www.planta.cn/forum/files_planta/methods_of_analysis_212.pdf)
60. Orlov DS Soil Chemistry. M.: MSU Publishing, 1992. 399 pp. (in Russian)
61. Lurie YY Handbook of Analytical Chemistry. M.: Chemistry, 1979. 480 pp. (in Russian)
62. Minkina TM, Pinsky DL, Samokhin AP, Statovoy AA The absorption of copper, zinc and lead in the ordinary blacksoil at mono- and poly-element pollution // Agrochemistry. 2005. № 8. pp. 58–64. (in Russian)
63. Reznikov AA, Shaposhnik VA Computer simulation of the formation of ion pairs in the electrolyte solution // Bulletin of Voronez State University. Series: Chemistry. Biology. Farmatseya. 2005.2: 65–68. (in Russian)
64. Collection of sanitary standards and methods of control of harmful substances in the environment. M., 1991. (in Russian)



65. Minkina TM, Pinsky DL, Mandzhieva SS, Bauer TV, Sushkova SN, Kushnarev AV Effect of concomitant anion to cation balance in the soil-solution (on example of ordinary black soil) // Soil science. 2014. № 8. pp. 932–940. DOI: 10.7868/S0032180X14080103 (in Russian)
66. Sposito G.. The Future of an Illusion: Ion Activities in Soil Solutions, Soil Science Society of America Journal 48: 531–536, 1984. doi:10.2136/sssaj1984.03615995004800030012x
67. Bjerrum J., Schwarzenbach G., Sillen L.G., Sykes K.W. Stability constants of metal-ion complexes with solubility products of inorganic substances. Part II. Inorganic ligands. London: The Chemical Society, 1958. 131 p. <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/210262>
68. Davies C.W. Ion association. London: Butterworths Sci. Publ., 1962. 190 p. <http://www.sciencemag.org/content/143/3601/37>
69. Lisetskii F.N., Pavlyuk Ya.V., Kirilenko Zh.A. and Pichura V.I. Basin organization of nature management for solving hydroecological problems // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. Vol. 39. №. 8. pp. 550–557. DOI: 10.3103/S106837391408007X (in Russian)
70. Guidelines for the determination of total content of strontium and calcium in the soil. M. CINAO, 1999. (in Russian)
71. Theory and practice of chemical analysis of soil / Ed. LA Vorobyova. M.: GEOS, 2006. 400 pp. (in Russian)
72. Dmitriev EA Mathematical Statistics in Soil Science. Moscow: Moscow State University Press, 1995. 320 pp. (in Russian)
73. Amakor X.N., Jacobson A.R., Cardon G.E. Improving estimates of soil salinity from saturation paste extracts in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 2013. 3: 792–799. DOI: 10.2136/sssaj2012.0235.
74. Chialvo A.A., Cummings P.T., Cochran H.D., Simonson J.M., Mesmer R.E. Na<sup>+</sup>–Cl<sup>-</sup> ion pair association in supercritical water // J. Chem. Phys. 1 December 1995. V. 103. Issue 21. pp. 9125–9516. <http://dx.doi.org/10.1063/1.470707>
75. Bakoyev S.Y., Endovitsky A.P., V.P. Kalinichenko, A.A. Ivanenko Computer program ION-2 for calculation of ion-associate equilibrium in soil solution // Fertility. 2009. № 6. pp. 22–23. (in Russian)
76. Endovitsky A.P., V.P. Kalinichenko, S.Y. Bakoyev, A.A. Ivanenko, V.A. Sukovatov and E.V. Radevich, Certificate of the state registration of computer program No 2009612162 «ION-2". Patentee Don State Agrarian University. 2009. (in Russian)

УДК 631.416.848

### Термодинамическая характеристика состояния стронция в черноземе обыкновенном при внесении фосфогипса

<sup>1</sup> Анатолий Петрович Ендовицкий

<sup>2</sup> Татьяна Михайлова Минкина

<sup>3</sup> Валерий Петрович Калиниченко

<sup>1,3</sup> Институт плодородия почв юга России, Российская Федерация  
346493 Персиановка, Октябрьского района, Ростовской области,  
ул. Кривошлыкова, корпус 2

<sup>2</sup> Южный Федеральный университет, Российская Федерация  
344006 Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105

<sup>1</sup> Эксперт

<sup>2</sup> Доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов

E-mail: [tminkina@mail.ru](mailto:tminkina@mail.ru)

<sup>3</sup> Доктор биологических наук, профессор, директор

E-mail: [kalinitch@mail.ru](mailto:kalinitch@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрено термодинамическое состояние главных ионов и Sr в черноземе обыкновенном карбонатном Краснодарского края при внесении в него

фосфогипса в дозах 10, 20, 40 т/га в модельном эксперименте. На основе классической теории состояния электролитов в растворах в модельной системе предложена математическая модель расчета термодинамического состояния Sr в почвенном растворе и водной вытяжке с использованием молярных концентраций, формальных значений заряда ионов и ионных пар, а также коэффициентов их активности. С учетом ассоциации ионов и ионной силы расчетная активность Sr в водной вытяжке по сравнению с идеальным раствором уменьшается на 40; 44; 52 % в зависимости от дозы фосфогипса 10, 20, 40 т/га соответственно. Расчетная активность  $\text{Ca}^{2+}$  понижается, соответственно, на 41; 44; 53 %. Это является термодинамическим объяснением повышения отношения молярных концентрация Ca/Sr в почве в связи с внесением фосфогипса.

Термодинамическое состояние Sr в черноземе свидетельствует, что при дозе фосфогипса 34 т/га отношение молярных концентрация Ca/Sr не достигает значения, опасного с точки зрения возникновения урвской болезни.

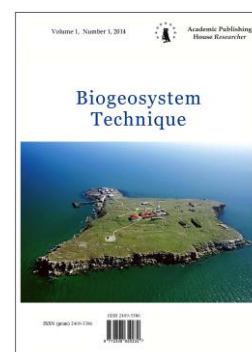
**Ключевые слова:** чернозем, фосфогипс, мелиорация, термодинамическое состояние, Sr, ассоциация, активность, формы ионов.

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation  
Biogeosystem Technique  
Has been issued since 2014.  
ISSN: 2409-3386  
E-ISSN: 2413-7316  
Vol. 6, Is. 4, pp. 363-373, 2015

DOI: 10.13187/bgt.2015.6.363  
[www.ejournal19.com](http://www.ejournal19.com)



UDC 575.224.42 + 575.28

### **Genomic Scanning Using the Retrotransposon Fragments as "Anchors", in Animals and Plants**

<sup>1</sup>Valery I. Glazko  
<sup>2</sup>Maria A. Elkina  
<sup>3</sup>Tatiana T. Glazko

<sup>1,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Russian Federation

127550 Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, Russian Federation

<sup>1,3</sup> Center of Experimental Embryology and Reproductive Biotechnologies, Russian Federation  
Russian Academy of Agricultural Science, 127422, Kostyakow st., 12, Bl. 4, Moscow

<sup>1</sup> Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Academician of Russian Academy of Science (foreign participator)

E-mail: [vglazko@yahoo.com](mailto:vglazko@yahoo.com)

<sup>2</sup> Researcher, Center for Nanobiotechnology

E-mail: [E-mariyaelkina@yahoo.com](mailto:E-mariyaelkina@yahoo.com)

<sup>3</sup> Dr. of Agricultural Sciences, Professor, Senior Researcher

E-mail: [tglazko@rambler.ru](mailto:tglazko@rambler.ru)

#### **Abstract**

Possibilities of using the terminal fragments of mobile elements of plants and animals for polyloci genotyping (genome scan) of agricultural species of animals and plants were discussed. The results of using as primers in polymerase chain reaction the terminal fragments of endogenous retroviruses dicotyledons and monocotyledons as "anchors" for polyloci genotyping allowed to assert the high representation of mobile elements, typical of plants, in the genomes of cattle, sheep, horses. The identified polymorphism of IRAP-markers (Inter-Retrotransposon Amplified Polymorphism) estimated by the polymorphism of DNA fragments flanked by terminal portions of plant endogenous retroviruses in genomes of farm animals, enabled to offer their using to detect the species and intraspecies differentiation of farm animal groups. Polymorphism of IRAP-markers evaluated when used as primers the fragments of endogenous retroviruses of plants and animals, allowed to choose the locus combinations to establish membership to the particular animal (species, breed, interbreed) groups. The results of genotyping the dicotyledons (*G. soja*, *G. max*) and monocots (*T. aestivum*) with the use as primer of the long terminal repeat of retrotransposon, first identified in soybean, testify the presence in genomes of monocots a large number of fragments, homologous to the inverted terminal repeats of endogenous retroviruses of dicotyledons. High level of IRAP-marker polymorphism allowed the targeted search the genomic sites, polymorphism of which could be associated with the influence of factors of natural and artificial selections. The presence of the long terminal repeats of the same endogenous retroviruses in plant and animal genomes, revealed in the genome sequences of the wheat and *G. max*, cattle,

sheep and horses, belonging to different kingdom, reflected the existence of common pool of mobile elements in general.

**Keywords:** mobile genetic elements, genomic scan, IRAP-PCR markers, polymorphic information content (PIC), sheep, horse, cattle, *T. aestivum*, *G. max*, *G. soja*.

### Введение

Уменьшение скорости сокращения биоразнообразия и его сохранение необходимо для жизнеобеспечения и продовольственной безопасности людей во всем мире [9, 13]. В этой связи, особое значение имеют программы по сохранению биоразнообразия сельскохозяйственных видов [5, 10]. Для исключения ошибок происхождения, оценок филогенетических взаимоотношений между исследуемыми группами, находящимися под давлением естественного и искусственного отборов, выявления геномных элементов, ассоциированных с изменчивостью хозяйственно ценных признаков, используются различные поколения молекулярно-генетических маркеров полиморфизма геномных элементов [3–4, 6–8]. Так, например, в целях выявления геномных мишеней искусственного отбора, ассоциированных с желательными проявлениями признаков продуктивности у мясных и молочных пород крупного рогатого скота, созданы геномные карты распределения мононуклеотидных полиморфизмов (Single Number Polymorphisms – SNP), включающие 705243 таких сайтов, распределенных по всем аутосомам [19]. Оказалось, однако, что такие связи породоспецифичны и характеризуются высокой внутривидовой изменчивостью. Для увеличения эффективности маркирования геномных доменов, полиморфизм которых можно было бы использовать для решения задач геномной селекции, к SNP привлекается новое поколение маркеров, основанное на изучении полиморфизма по копиям коротких (менее 400 пар нуклеотидов – п.н.) участков ДНК (Copy Number Variability – CNV) и их геномного распределения [18]. Выяснилось, что эти два подхода (SNP и CNV) к полилокусному генотипированию геномов крупного рогатого скота также не приводят к однозначным результатам. Так, у голштинской породы с использованием оценок полиморфизма микросателлитных локусов и SNP ранее выявлены хромосомные домены локализации генов количественных признаков (Quantitative Trait Loci – QTL). Из 82 таких доменов, в которых обнаруживались CNV, только 17 перекрывались с SNP. В 20 хромосомных доменах локализации QTL присутствовали CNV, но не SNP. На основании выполненных исследований авторы делают вывод о необходимости совместного использования SNP и CNV для решения задач включения геномной селекции в традиционные селекционные методы.

В то же время такое полилокусное генотипирование (геномное сканирование) — затратная и достаточно сложная процедура, а ее результаты трудно интерпретировать. В этой связи особый интерес вызывают геномные элементы с высоким уровнем полиморфизма, к которым относятся, в частности, микросателлитные локусы. На основании оценок полиморфизма той части микросателлитов, которые формируют на коротких участках геномной ДНК инвертированные повторы, разработан метод полилокусного геномного генотипирования ISSR-PCR (Inter-Simple Sequence Repeats) [20]. Это поколение маркеров в связи с относительной дешевизной получения полилокусных спектров продуктов амплификации и простотой их интерпретации широко использовалось и используется для решения популяционно-генетических задач большого количества видов растений и животных.

Однако этот тип маркеров имеет ряд недостатков, в частности, «анонимность» участков ДНК, фланкированных инвертированным повтором микросателлита. Секвенирование таких фрагментов геномной ДНК позволило обнаружить, что они содержат участки гомологии к мобильным генетическим элементам или продуктам их рекомбинации [1–2]. В литературе накоплено большое количество экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что распространение микросателлитов, и в частности, их инвертированных повторов, тесно связано с транспозициями ретротранспозонов [11–12, 14, 16]. Обнаружено также, что участки локализации ретротранспозонов с высокой частотой вовлекаются в рекомбинации и ассоциированы с полиморфизмом по CNV маркерам [17]. Поколение молекулярно-генетических маркеров, созданных на основании оценок полиморфизма фрагментов ДНК, фланкированных инвертированными повторами участков гомологии к ретротранспозонам, получило название IRAP-маркеров (Inter-Retrotransposon

Amplified Polymorphism). Широкая представленность рероранспозонов в геномах животных и растений, высокая частота их транспозиций [15], связь с полиморфизмом микросателлитных локусов, а также CNV позволяет предполагать особую перспективность IRAP-маркеров для выявления специфических особенностей внутривидовых групп организмов сельскохозяйственных видов, поисках молекулярно-генетических маркеров действия факторов искусственного и естественного отборов. Для выяснения возможностей использования этого поколения маркеров в настоящей работе выполнен анализ генофондов некоторых местных пород сельскохозяйственных видов животных и сортов культурных и дикорастущих растений по IRAP-маркерам.

### Материалы и методы

В работе были исследованы следующие породы сельскохозяйственных видов животных крупного рогатого скота: черно-пестрый голштинизированный скот (23 гол., виварий РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева; 10 гол. животноводческая ферма «Степаньково», Московская обл.), айширский скот (24 гол., МКЗ №1 Московской обл.), якутский скот (10 гол., респ. Саха), красный эстонский скот (29 гол., Псковская обл.), зебувидный скот (овец: эдильбаевские овцы (35 гол., Волгоградская обл.), карачаевские (20 гол., Ставропольский кр.); лошадей: алтайская порода (23 гол., хозяйство «Джумбаев», 39 гол., хозяйство «Энчи», 31 гол., хозяйство «Чингиз», респ. Алтай), карачаевская порода (16 гол., Ставропольский кр.), рысистая порода (36 гол., Московская обл.). В работе также были использованы образцы мягкой пшеницы (*Triticum aestivum*): Московская 39, Мироновская 808, Омская 36 (всего 60 образцов, РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева), сои дикорастущей уссурийской вида *G. Soja* (50 образцов, Приморский кр.) сорнополевой сои Полукультурной С 10 вида *G. max* (10 образцов, Китай).

Геномную ДНК выделяли из периферической крови исследуемых сельскохозяйственных животных с помощью коммерческого набора реагентов «ДНК-Экстран-1», из образцов семян *Triticum aestivum*, *Glycine soja*, *Glycine max* – с помощью коммерческого набора реагентов «ДНК-Экстран-4» («Синтол», Россия) согласно рекомендациям производителя к наборам.

IRAP-PCR проводили по модифицированной методике Зеткевича и др. (Zeitkiewicz E. et al., 1994). В качестве праймеров использовали олигонуклеотидные последовательности, гомологичные терминальным инвертированным фрагментам мобильных элементов: LTR SIRE-1 (GCAGTTATGCAAGTGGGATGAGCA, праймер LTR SIRE-1), мобильных элементов семейства R173 (AACGAGGGGTTTCGAGGCC, праймер PawS 5; GAGTGTCAAACCCAACGA, праймер PawS 6), BARE-1 (ССААСТАГАГГСТТГСТАГГГАС, праймер BARE-1), эндогенных ретровирусов крупного рогатого скота BERV K1 и BERV β-3 (TATCAGGCCTCTCCGCATG, праймер BERV k-1; GGACSTTCTCSTTCAAGGC, праймер BERV β-3) («Синтол», Россия). Программа амплификации: первоначальная денатурация 94°C – 2 мин, денатурация 94°C – 30 с, отжиг 55°C – 30 с, элонгация 72°C – 2 мин, заключительная элонгация 72°C – 10 мин, 35 циклов (амплификатор «Терцик», «ДНК-технологии», Россия). Разделение продуктов амплификации проводили в 1,5 % агарозном геле с добавлением бромистого этидия (0,5 мкг/мл). Сила тока – 50 мА, напряжение 100 В. Визуализацию результатов электрофореза проводили в УФ (λ = 312 нм) (трансиллюминатор УВТ-1, «Биоком», Россия).

Каждый фрагмент в полученных спектрах ДНК рассматривали как отдельный локус. Оценивали присутствие/отсутствие фрагмента определенной длины в спектрах. Математическая обработка (расчеты частот встречаемости аллелей) осуществлялась с использованием Microsoft Excel, филогенетические расчеты выполняли в компьютерной программе TFPGA, имеющейся в открытом доступе. Расчет индекса PIC (Polymorphic Information Content) выполнялся по формуле для диаллельных локусов исходя из закона о равновесных популяциях Харди-Вайнберга, для которых  $PIC = 2f(1-f)$ , где  $f$  – частота одного из двух аллелей.

### Результаты собственных исследований и их обсуждение

#### Генетическая дифференциация пород крупного рогатого скота

В результате генотипирования групп крупного рогатого скота по праймеру LTR SIRE-1 были получены следующие данные. Локусы длиной 1200, 1100, 580 и 520 п.о. встречались у

всех исследованных групп животных. Самые полиморфные локусы приходились на фрагменты длиной 1470, 1300 и 820 п.о. ( $PIС > 0,450$ ). Наиболее гетерогенной оказалась группа айширского скота ( $PIС_{ср.} = 0,214$ ,  $P = 43$  %). Остальные исследованные группы существенно не отличались друг от друга. Фрагмент длиной 790 п.о. не встречался в спектрах черно-пестрого скота («РГАУ-МСХА»), красного эстонского и зебувидного скота, у последних двух отсутствовал также локус 760 п.о. Фрагменты 440 и 330 п.о. не были детектированы у якутских коров, тогда как у других пород они встречались с высокой частотой (1,00, 0,96). Только айширские коровы были гетерогенны по локусу длиной 950 п.о. ( $PIС_{локуса} = 0,325$ ).

Спектр фрагментов праймера Paws 5 более полиморфный по сравнению со спектром праймера LTR SIRE-1. Только два локуса длиной 840 и 610 п.о. были мономорфны и встречались у всех исследованных животных.

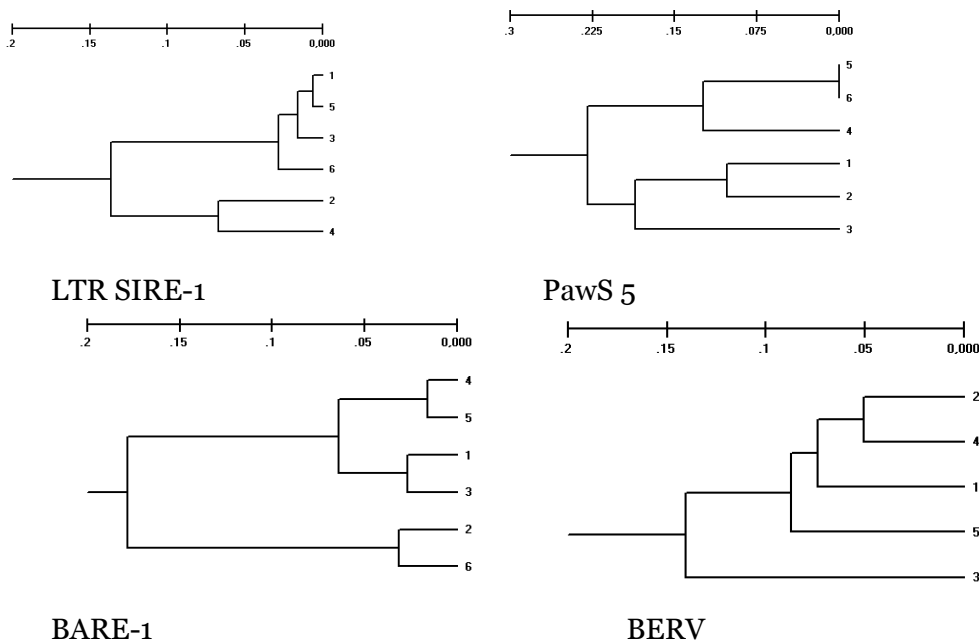
Значения генетических характеристик ( $P_{пр.}$  и  $PIС_{пр.}$ ) спектра праймера BARE-1 близки к таковым у спектра праймера LTR SIRE-1, что свидетельствует о схожем уровне полиморфизма терминальных повторов этих двух мобильных элементов однодольных в геномах крупного рогатого скота. В спектрах присутствовали четыре мономорфных фрагмента 1000, 910, 560 и 280 п.о. По значениям  $P$  и  $PIС$  наиболее близки оказались айширские и якутские коровы, несколько большее число полиморфных локусов наблюдалось у группы черно-пестрого скота РГАУ-МСХА, при этом животные этой породы из другого хозяйства оказались высоко консолидированы. Интересно отметить большое количество полиморфных участков (73 %) с одновременно низким значением полиморфизма локусов ( $PIС = 0,090$ ) в спектре казахских белоголовых коров.

При сравнении спектров праймеров, гомологичным терминальным участкам эндогенных ретровирусов крупного рогатого скота, наибольшим полиморфизмом обладают спектры праймера BERV k-1. Фрагмент 540 п.о., а также фрагменты меньше 400 п.о. встречались у всех исследованных животных. Наибольшие отличия между двумя группами черно-пестрого скота наблюдались в зоне тяжелых длин фрагментов (более 1000 п.о.). Высокие значения полиморфизма спектра ДНК якутских коров по праймеру BERV k-1, в основном, обусловлены полиморфизмом фрагментов средней длины ( $PIС = 0,342$ ), а в случае праймера BERV  $\beta$ -3 – тяжелых фрагментов ( $PIС = 0,314$ ), в то время как спектры фрагментов этого праймера у других исследованных пород животных мономорфны.

Группа зебувидного скота отличалась пониженными значениями  $P$  и  $PIС$  по всем праймерам, за исключением BERV k-1, где значения этих генетических характеристик были близки к таковым у местного якутского скота, разводимого на краю ареала, и несколько выше, чем у других групп крупного рогатого скота.

Исходя из значений полиморфизма фрагментов спектров используемых праймеров, были построены дендрограммы и рассчитаны генетические расстояния по методу М. Нею. На дендрограммах, построенных по значениям полиморфизма, полученных с применением в качестве праймеров участков мобильных элементов растений, присутствовали два крупных кластера (рис.).

Эти кластеры наиболее удалены друг от друга на дендрограммах спектров праймеров, гомологичных участкам эндогенных ретровирусов однодольных (Paws 5 и BARE-1, и в полтора раза ближе они находятся на дендрограмме спектра праймера эндогенного ретровируса двудольных (LTR SIRE-1). На дендрограмме, построенной на основании значений полиморфизма спектров праймеров к терминальным участкам эндогенных ретровирусов полорогих, местные якутские коровы обособляются в отдельный кластер, генетическое расстояние с другими группами КРС составило от 0,130 до 0,146.



**Рис. 1.** Дендрограммы построенные на основании генетических дистанций, рассчитанных по значениям полиморфизма спектров праймеров LTR растений (LTR SIRE-1, PawS 5, BARE-1) и LTR животных (BERV  $\beta$ -3 и k-1 вместе) у крупного рогатого скота. Обозначения групп животных: 1 – черно-пестрый (виварий), 2 – черно-пестрый «Степаньково», 3 – якутский скот, 4 – айширский скот, 5 – красный эстонский скот, 6 – зебувидный скот.

### **Генетическая дифференциация местных курдючных пород овец**

Для исследования были выбраны три породы овец (всего 80 голов): карачаевская, калмыцкая, эдильбаевская (два внутрипородных типа – бирликский и суюндукский).

Спектры фрагментов ДНК, полученные в результате генотипирования групп местных родственных между собой пород овец, калмыцких и эдильбаевских, с применением в качестве праймера терминального участка ретротранспозона LTR SIRE-1 отличались относительно одинаковыми значениями полиморфизма ( $PI_{ср.}=(0,081; 0,112)$ ,  $P=(19; 31)$  %). При этом карачаевские овцы оказались более однородными. Фрагмент длиной 1080 п.о. был полиморфен только в спектрах ДНК эдильбаевских овец ( $PI_{лок.}=0,488$ ), тогда как фрагменты 650 и 380 п.о. – в спектрах ДНК карачаевских и калмыцких овец ( $PI_{650}=(0,494; 0,483)$ ,  $PI_{380}=(0,189; 0,469)$ ). Фрагменты длиной 760 и 430 п.о. были полиморфными только у калмыцких овец: первый оказался одним из самых редких и встречался только у представителей данной породы, второй встречался с частотой 0,44, тогда как у других пород – у всех животных.

Спектры фрагментов ДНК всех исследованных групп овец, полученных с использованием праймера PawS 5, отличались высоким уровнем полиморфизма. Фрагмент 910 п.о. был полиморфен только в спектрах карачаевских (0,494), 720 п.о. – в спектрах ДНК калмыцких овец (0,295). Полиморфизм локуса 760 п.о. был характерен для обеих пород, тогда как у эдильбаевских овец он встречался у всех животных.

Полиморфизм спектров по праймеру BARE-1 у калмыцких и эдильбаевских овец сходен с таковым по праймеру PawS 5, тогда как группа карачаевских овец оказалась однородной. Фрагмент длиной 1320 п.о. отсутствовал у представителей карачаевской породы, тогда как у овец других пород встречался с высокой частотой ( $\geq 0,8$ ). Спектр ДНК карачаевских овец отличался низкой по сравнению с другими группами частотой встречаемости фрагмента длиной 700 п.о. (0,2). Фрагменты 520 и 590 п.о. были полиморфны только у калмыцких и эдильбаевских овец.

Полиморфизм спектров, полученных с использованием фрагментов эндогенных ретровирусов, отличался в зависимости от используемого праймера. Так, спектры праймера

BERV k-1 были более полиморфными по сравнению со спектрами праймера BERV  $\beta$ -3. При этом праймер BERV k-1 не отличает группы овец, где треть всех локусов были полиморфными и  $PI_{cp}(0,099; 0,130)$ . Стоит отметить относительно низкие значения полиморфизма спектров ДНК калмыцких овец по сравнению с эдильбаевскими.

### **Генетическая дифференциация пород лошадей**

Исследования выполнены на 88 образцах крови лошадей различной породной принадлежности и происхождения. В анализ включены результаты исследований образцов крови лошадей карачаевской породы, вошедших в ГПК, алтайской породы из трех хозяйств («Джумбаев», «Энчи», «Чингиз»), группы рысистых пород (орловские рысаки, русские рысаки, американские стандартбредные).

В результате выполненных исследований получены следующие данные. Спектры ампликонов, полученных с применением в ПЦР разных праймеров, существенно не отличались между собой по пределам длин выявляемых фрагментов ДНК у всех пород лошадей. Несколько отличается только спектр фрагментов праймера RawS 5, где четко визуализируются и локусы более 1500 п.о.

Каждый из полученных в результате полимеразной цепной реакции спектров фрагментов ДНК уникален для каждого из праймеров и отличается долей полиморфных локусов и их распределением. Наиболее полиморфными оказались спектры фрагментов геномной ДНК алтайских лошадей хозяйства «Джумбаев», полученные в результате IRAP-PCR с использованием праймеров LTR SIRE-1 и RawS 5. В результате использования праймера  $\beta$ -3 около половины всех локусов в спектрах лошадей хозяйства «Энчи» и несколько меньшее количество полиморфных локусов в спектрах алтайских лошадей третьей группы представлены фрагментами от 500 до 1000 п.о., в свою очередь, полиморфизм фрагментов более 1000 п.о. наблюдался только у первых (18 %). Карачаевские лошади по IRAP-маркерам отличались единообразием в полиморфизме локусов в спектре и охватывали диапазон как средних, так и тяжелых длин фрагментов (от 5 до 10 %). Спектры фрагментов праймера k-1 были одинаковы у всех исследованных пород лошадей: на долю фрагментов средних длин приходилось 14 % полиморфных локусов, на тяжелые фрагменты – 7 %.

На общем фоне низких значений  $PI$  и  $P$  локусов, полученных в спектре праймера k-1 у всех пород лошадей, несколько более высокими оказываются показатели этих характеристик у рысистых лошадей. Это может быть связано с неоднородностью самой исследуемой группы рысаков, которую составляют представители орловских, русских и американских стандартбредных рысистых пород. В спектрах праймера  $\beta$ -3 как минимум треть всех локусов были полиморфны у исследованных пород. Внутрипородные отличия групп алтайских лошадей по спектрам праймера  $\beta$ -3 выражены менее явно, за исключением несколько более консолидированных лошадей из хозяйства «Чингиз», чьи характеристики спектров близки к карачаевским лошадям. Промежуточное положение занимают рысистые лошади.

При генотипировании групп лошадей с использованием IRAP-маркеров, представляющих собой терминальные участки эндогенных ретровирусов, дифференциация их выглядит следующим образом: алтайские лошади хозяйств «Энчи» и «Чингиз» объединены в один кластер, в другом кластере формируются две самостоятельные группы. Одну формируют американские и русские рысаки, другую – карачаевские, алтайские лошади (хозяйство «Джумбаев») и орловские рысаки, при этом обособленно располагаются последние.

### **Генетическая дифференциация сортов мягкой пшеницы и групп сои**

Исследования выполняли на однодольных растениях *Triticum aestivum* и двудольных растениях (*Glycine soja* и *Glycine max*). Пшеница была представлена двумя озимыми сортами (Московская 39 — мягкая озимая, Мироновская 808 — мягкая озимая, выведена из яровой) и одним яровым (Омская 36 — мягкая яровая), соя — пятью популяциями вида дикорастущая уссурийская (*G. soja*, Приморский край) и сорнополевой формой сои (*G. max*, Китай).

В результате использования праймера к терминальному участку ретроэлемента сои LTR SIRE-1 получены отчетливо воспроизводимые спектры фрагментов ДНК как у сои, так и у пшеницы, причем такие фрагменты находились в одном диапазоне длин: суммарно до 22 локусов длиной 350–1240 п.н., 26 локусов — 220–1450 п.н.. Анализируемые группы



Glucine обладали высоким полиморфизмом ( $PI_{cp.}=0,414$ ,  $P=91\%$ ) по сравнению с *T. aestivum* ( $PI_{cp.}=0,120$ ,  $P=65\%$ ). С использованием баз данных GenBank был выполнен поиск участков гомологии к фрагменту LTR SIRE-1, послужившему праймером, в секвенированных последовательностях геномов *T. aestivum* и *G. max* и выявлены соответственно 122 и 102 таких участка. У *Glucine* наиболее полиморфными оказались фрагменты длиной от 350 до 490 п.н. и от 1010 до 1240 п.н. Значения  $PI_{cp.}$  для этих фрагментов составили соответственно 0,449 и 0,364. У *T. aestivum*, наоборот, высокий полиморфизм наблюдался в зоне средних длин (от 520 до 720 п.н. и от 760 до 990 п.н.,  $PI_{cp.}=0,196$  и 0,155, соответственно). Все тяжелые фрагменты были мономорфными и встречались у 100 % исследованных образцов пшеницы.

У *Glucine* был обнаружен только один мономорфный локус длиной 700 п.н., в среднем же доля полиморфных локусов по спектру составила 93 %,  $PI_{cp.}=0,414$ . Это свидетельствует об относительно высоком генетическом разнообразии исследованных групп как внутри рода *Glucine*, так и внутри одного вида *G. soja*. При этом у *G. max* отсутствовал локус длиной 680 п.н., тогда как тот же локус встречался у представителей *G. soja*.

С использованием фрагмента ретротранспозона LTR SIRE-1 в качестве праймера были получены уникальные для каждого из сортов пшеницы спектры фрагментов ДНК. Так, у сорта пшеницы Московская 39 фрагмент ДНК длиной 790 п.н. присутствовал у всех исследованных образцов этого сорта, тогда как у сортов Мироновской 808 и Омской 36 фрагментов такой длины не обнаружили. И наоборот, локус, соответствующий фрагменту размером 550 п.н., не встречался только у сорта Московская 39, у остальных сортов по этому локусу  $PI_{cp.}$  был равен 1.

В связи с неодинаковой представленностью у разных сортов, наибольший интерес в случае пшеницы представляют локусы, соответствующие фрагментам 790 и 550 п.н., сои – локусы 790, 680 и 550 п.н.

На основании значений генетических дистанций (DN), рассчитанных по методу M. Nei (1972) исходя из частоты ампликонов разной длины в полученных спектрах фрагментов ДНК, фланкированных инвертированными участками фрагмента ретротранспозона LTR SIRE-1, обнаружена кластеризация исследованных образцов: по генетическим расстояниям отдельно объединялись однодольные и двудольные растения; среди однодольных наибольшая близость обнаружена между сортами пшеницы Мироновская 808 и Омская 36.

Интересно отметить, что в геноме сои не было выявлено гомологии к мобильным элементам таких однодольных растений, как рожь (PawS 5 и PawS 6) и ячмень (BARE-1), участки которых использовались в качестве праймеров, при этом у пшеницы мы получали спектры фрагментов ДНК, фланкированные участками этих ретротранспозонов. Праймеры PawS 5 и PawS 6 каждый в отдельности дает менее полиморфный спектр фрагментов ДНК по сравнению с праймером LTR SIRE-1 ( $PI_{cp.}=0,073$ ). В результате применения PawS 5 в качестве прямого, а PawS 6 – обратного праймеров, амплифицировались как фрагменты, характерные для спектра праймера PawS 5, так и фрагменты спектра праймера PawS 6. Тем не менее, были и локусы, которые впервые были обнаружены именно в такой постановке реакции, а именно 7 фрагментов длиной от 650 до 150 п.о., из которых один (550 п.о.,  $PI_{cp.}=0,48$ ) полиморфный.

Проанализировав секвенированные последовательности ГенБанка с помощью алгоритмов BLASTn на наличие участков, гомологичных ретротранспозонам BARE-1, PawS 5 и PawS 6 было обнаружено, что они присутствуют в геноме сои, тогда как в результате полимеразной цепной реакции, где в качестве матрицы используется ДНК сои, они не амплифицируются. Аналогичная картина просматривается и в случае использования в качестве праймеров участков эндогенных ретровирусов млекопитающих, BERV  $\beta$ -3 и k-1. Это можно объяснить тем, что данные участки ретротранспозонов в геноме сои и пшеницы не образуют инвертированных повторов, либо они лежат на расстоянии больше 3 тыс. п.о., что недоступно для амплификации в выбранном режиме проведения полимеразной цепной реакции.

## Заклучение

Полученные данные позволяют сделать следующее заключение.

Данные полилокусного сканирования геномов сельскохозяйственных животных с использованием терминальных фрагментов эндогенных ретровирусов в качестве «якорей» для полилокусного генотипирования двудольных и однодольных растений в качестве молекулярно-генетических маркеров позволяют утверждать о высокой представленности участков мобильных элементов, типичных для растений, в геномах животных. Результаты генотипирования с использованием IRAP-маркеров на основе инвертированных терминальных фрагментов эндогенных ретровирусов отражают популяционно-генетические взаимоотношения между группами сельскохозяйственных животных (крупный рогатый скот, лошади, овцы) на видовом, внутривидовом и внутривидовом уровнях. Полиморфизм IRAP-маркеров на основе терминальных участков эндогенных ретровирусов растений в геномах сельскохозяйственных животных обуславливает возможность использования этого поколения маркеров для выявления внутривидовой и внутривидовой дифференциации групп животных. Полиморфизм фрагментов ДНК, полученных в результате использования IRAP-маркеров на основе инвертированных терминальных участков эндогенных ретровирусов растений и животных, позволяет подбирать сочетания локусов для установления принадлежности животного к конкретной (видовой, породной, внутривидовой) группе. Результаты генотипирования двудольных (*G. soja*, *G. max*) и однодольных растений (*T. aestivum*) с применением в качестве праймера длинного концевой участка ретротранспозона, впервые выявленного у сои, свидетельствуют о присутствии в геномах однодольных большого количества фрагментов, гомологичных инвертированным терминальным участкам эндогенных ретровирусов двудольных. Высокий уровень полиморфизма IRAP-маркеров позволяет проводить целенаправленный поиск геномных участков, полиморфизм которых может быть ассоциирован с влиянием факторов естественного и искусственного отборов.

## Примечания:

1. Глазко В.И., Косовский Г.Ю., Ковальчук С.Н., Архипов А.В., Петрова И.О., Дедович Г.О., Глазко Т.Т. Инвертированный повтор микросателлита (AGC)<sub>6</sub>G фланкирует районы ДНК с участками гомологии к ретротранспозонам в геноме крупного рогатого скота // Инновационные технологии в медицине. 2014. 2(03). С. 63–79.
2. Глазко В.И., Фефилов А.В., Бардуков Н.В., Глазко Т.Т. Видоспецифичные ISSR-PCR маркеры и пути их формирования // Известия ТСХА. 2012. №1. С. 118–125.
3. Калашникова Л.А., Дудин И.М., Глазко В.И. и др. ДНК-технологии оценки сельскохозяйственных животных. Лесные Поляны (Моск. обл.), 1999. 148 с.
4. Календарь Р.В., Глазко В.И. Типы молекулярно-генетических маркеров и их применение // Физиология и биохимия культурных растений. 2002. Т. 34. №4. С. 279–296.
5. Состояние всемирных генетических ресурсов животных в сфере продовольствия и сельского хозяйства / FAO, 2010. М.: ВИЖ РАСХН, 2010.
6. Сулимова Г.Е. Молекулярно-генетический анализ генома животных и человека с использованием ДНК-маркеров. Автореф. дисс. д-ра биол. наук: 03.00.15. ИОГен имени Н.И. Вавилова. Москва, 1998. 38 с.
7. Сулимова Г.Е. ДНК-маркеры в генетических исследованиях: типы маркеров, их свойства и области применения // Успехи современной биологии. 2004. Т. 124. № 3. С. 260–271.
8. Храброва Л.А. Теоретические и практические аспекты генетического мониторинга в коневодстве. Автореф. дисс. д-ра с.-х. наук: 06.02.07. Дивово: ГНУ ВНИИ коневодства, 2011. 38 с.
9. Эрнст Л.К., Дмитриев Н.Г., Паронян И.А. Генетические ресурсы сельскохозяйственных животных в России и сопредельных странах. СПб.: ВНИИГРЖ, 1994. 472 с.
10. Эрнст Л.К., Зиновьева Н.А. Биологические проблемы животноводства в XXI веке. М., 2008. 508 с.
11. Adelson D. L., Raison J.M., Garber M., Edgar R. C. Interspersed repeats in the horse (*Equus caballus*); spatial correlations highlight conserved chromosomal domains . *Animal Genetics*, 2010, 41 (Suppl. 2): 91–99;

12. Grandi F.C., An W. Non-LTR retrotransposons and microsatellites. Partners in genomic variation. *Mobile Genetic Elements*, 2013, 3: e25674 (<http://dx.doi.org/10.4161/mge.25674>)
13. Marton-Lefèvre J. Biodiversity Is Our Life // *Science*, 2010, V.327, pp. 1179.
14. McInerney C.E., Allcock A.L., Johnson M.P., Bailie D.A., Prodohl P.A. Comparative genomic analysis reveals species dependent complexities that explain difficulties with microsatellite marker development in mollusks. *Heredity*, 2011, 106: 78–87.
15. Miousse I.R., Chalbot M.C., Lumen A., Ferguson A., Kavouras I.G., Koturbash I. Response of transposable elements to environmental stressors. // *Mutat Res Rev Mutat Res*. 2015. Vol. 765. pp.19–39.
16. Smyka P., Kalendar R., Ford R., Macas J., Griga M. Evolutionary conserved lineage of Angela-family retrotransposons as a genome-wide microsatellite repeat dispersal agent. *Heredity*, 2009, 103: 157–167.
17. Startek M., Szafranski P., Gambin T., Campbell I.M., Hixson P., Shaw C.A., Stankiewicz P., Gambin A. Genome-wide analyses of LINE-LINE-mediated nonallelic homologous recombination. *Nucleic Acids Res*. 2015. 43 (4): 2188–2198. doi: 10.1093/nar/gku1394
18. Xu L., Cole J.B., Bickhart D.M., Hou Y., Song J., VanRaden P.M., Sonstegard T.S., Van Tassell C.P., Liu G.E. Genome wide CNV analysis reveals additional variants associated with milk production traits in Holsteins. *BMC Genomics*. 2014. 15:683 <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/15/683>)
19. Zhao F., McParland S., Kearney F., Du L., Berry D.P. Detection of selection signatures in dairy and beef cattle using high-density genomic information. *Genetics Selection Evolution*, 2015, 47:49. DOI 10.1186/s12711-015-0127-3)
20. Zietkiewicz E., Rafalski A., Labuda D. Genome Fingerprinting by simple sequence repeat (SSR)-anchored polymerase chain reaction amplification. // *Genomics*. 1994. V. 20. №2. pp. 176–183.

#### References:

1. Glazko VI, Kosovskiy GY, Kovalchuk S., Arkhipov AV, Petrova IO Dedovich GO, Glazko TT The inverted repeat of microsatellite (AGC)<sub>6</sub>G flanking the DNA regions of homology to the retrotransposon into the genome of cattle // *Innovative technologies in medicine*. 2014 2 (03). pp. 63–79.
2. Glazko VI, Feofilov AV Bardukov NV, Glazko TT Species-specific ISSR-PCR markers and the ways of their formation // *Bulletin of the TAA*. 2012. №1. pp. 118–125.
3. Kalashnikov L.A, IM Dudin, VI Glazko et al. DNA technology of farm animals assessment. *Forest Glade (Mosk. obl.)*, 1999. 148 p.
4. Kalendar RV, Glazko VI Types of molecular genetic markers and their application // *Physiology and biochemistry of cultivated plants*. 2002. T. 34. №4. pp 279–296.
5. The State of the World's Animal Genetic Resources for Food and Agriculture, edited by Barbara Rischkowsky & Dafydd Pilling. Rome, 520 p.
6. Sulimova GE Molecular genetic analysis of the animal's genome and humans using DNA markers. Author. diss. Dr. biol. Sciences: 03.00.15. IOGen named after NI Vavilov. Moscow, 1998. 38 p.
7. Sulimova GE DNA markers in genetic research: marker types, their properties and applications // *Advances of modern biology*. 2004. T. 124. № 3. pp. 260–271.
8. Khrabrova LA Theoretical and practical aspects of genetic monitoring in horse breeding. Author. diss. Dr of Agricultural Sciences: 06.02.07. Divov: State Research Institute of Horse Breeding, 2011. 38 p.
9. Ernst LK, NG Dmitriev, IA Paronyan Farm animal genetic resources in Russia and neighboring countries. SPb.: VNIIGRZH, 1994. 472 p.
10. Ernst LK, Zinovieva NA Biological problems of livestock in the XXI century. Moscow, 2008. 508 p.
11. Adelson D. L., Raison J. M., Garber M., Edgar R. C. Interspersed repeats in the horse (*Equus caballus*); spatial correlations highlight conserved chromosomal domains. *Animal Genetics*, 2010, 41 (Suppl. 2): 91–99;
12. Grandi F.C. , An W. Non-LTR retrotransposons and microsatellites. Partners in genomic variation. *Mobile Genetic Elements*, 2013, 3: e25674 (<http://dx.doi.org/10.4161/mge.25674>)
13. Marton-Lefèvre J. Biodiversity Is Our Life//*Science*, 2010, V.327, pp. 1179.

14. McInerney C.E., Allcock A.L., Johnson M.P., Bailie D.A., Prodohl P.A. Comparative genomic analysis reveals species dependent complexities that explain difficulties with microsatellite marker development in mollusks. *Heredity*, 2011, 106: 78–87.
15. Miousse I.R., Chalbot M.C., Lumen A., Ferguson A., Kavouras I.G., Koturbash I. Response of transposable elements to environmental stressors. // *Mutat Res Rev Mutat Res*. 2015. Vol. 765. pp. 19–39.
16. Smyka P., Kalendar R., Ford R., Macas J., Griga M. Evolutionary conserved lineage of Angela-family retrotransposons as a genome-wide microsatellite repeat dispersal agent. *Heredity*, 2009, 103: 157–167.
17. Startek M., Szafranski P., Gambin T., Campbell I.M., Hixson P., Shaw C.A., Stankiewicz P., Gambin A. Genome-wide analyses of LINE-LINE-mediated nonallelic homologous recombination. *Nucleic Acids Res*. 2015. 43 (4): 2188-2198. doi: 10.1093/nar/gku1394
18. Xu L., Cole J.B., Bickhart D.M., Hou Y., Song J., VanRaden P.M., Sonstegard T.S., Van Tassell C.P., Liu G.E. Genome wide CNV analysis reveals additional variants associated with milk production traits in Holsteins. *BMC Genomics*. 2014. 15:683 <http://www.biomedcentral.com/1471-2164/15/683>
19. Zhao F., McParland S., Kearney F., Du L., Berry D.P. Detection of selection signatures in dairy and beef cattle using high-density genomic information. *Genetics Selection Evolution*, 2015, 47:49. DOI 10.1186/s12711-015-0127-3
20. Zietkiewicz E., Rafalski A., Labuda D. Genome Fingerprinting by simple sequence repeat (SSR)-anchored polymerase chain reaction amplification. // *Genomics*. 1994. V. 20. №2. pp. 176–1833.

УДК 575.224.42 + 575.28

### **Геномное сканирование с использованием участков ретротранспозонов у животных и растений**

<sup>1</sup> Валерий Иванович Глазко

<sup>2</sup> Мария Александровна Елькина

<sup>3</sup> Татьяна Теодоровна Глазко

<sup>1-3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация

<sup>1,3</sup> Центр экспериментальной эмбриологии и репродуктивных биотехнологий, Российская академия наук, Российская Федерация

<sup>1</sup> Доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН (иностраный член)

E-mail: [vglazko@yahoo.com](mailto:vglazko@yahoo.com)

<sup>2</sup> Научный сотрудник Центра нанобиотехнологий

E-mail: [E-mariyaelkina@yahoo.com](mailto:E-mariyaelkina@yahoo.com)

<sup>3</sup> Доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник

E-mail: [tglazko@rambler.ru](mailto:tglazko@rambler.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены возможности применения терминальных фрагментов мобильных элементов растений и животных для полилокусного генотипирования (геномного сканирования) сельскохозяйственных видов животных и растений. Результаты использования в качестве праймеров в полимеразной цепной реакции терминальных участков эндогенных ретровирусов двудольных и однодольных растений в качестве «якорей» для полилокусного генотипирования позволяют утверждать о высокой представленности участков мобильных элементов, типичных для растений, в геномах крупного рогатого скота, овец, лошадей. Выявленный полиморфизм IRAP-маркеров (Inter-Retrotransposon Amplified Polymorphism) оцениваемый по полиморфизму фрагментов ДНК, фланкированных терминальными участками эндогенных ретровирусов растений в геномах сельскохозяйственных животных, позволяет предлагать их использование для выявления внутривидовой и внутрипородной дифференциации групп животных. Полиморфизм IRAP-

маркеров оцененный при использовании в качестве праймеров участков эндогенных ретровирусов растений и животных, позволяет подбирать сочетания локусов для установления принадлежности животного к конкретной (видовой, породной, внутривидовой) группе. Результаты генотипирования двудольных (*G. soja*, *G. max*) и однодольных растений (*T. aestivum*) с применением в качестве праймера длинного концевой участка ретротранспозона, впервые выявленного у сои, свидетельствуют о присутствии в геномах однодольных большого количества фрагментов, гомологичных инвертированным терминальным участкам эндогенных ретровирусов двудольных. Высокий уровень полиморфизма IRAP-маркеров позволяет проводить целенаправленный поиск геномных участков, полиморфизм которых может быть ассоциирован с влиянием факторов естественного и искусственного отборов. Проведен поиск терминальных участков гомологичных последовательностей мобильных элементов растений в геномах овец и лошадей, а также участков, гомологичных сайтам эндогенных ретровирусов млекопитающих, в секвенированных последовательностях пшеницы и генома *G. max*. Результаты присутствия участков ретротранспозонов, классически принадлежащих одному из царств, одновременно у представителей растений и животных, свидетельствуют об общности пула мобильных элементов в целом.

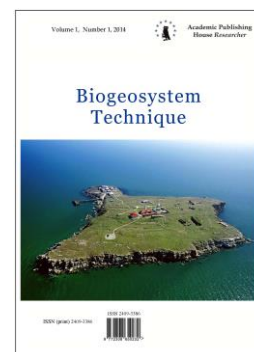
**Ключевые слова:** мобильные генетические элементы, геномное сканирование, IRAP-PCR маркеры, полиморфное информационное содержание (PIC), овцы, лошади, крупный рогатый скот, *T. aestivum*, *G. max*, *G. soja*.

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation  
Biogeosystem Technique  
Has been issued since 2014.  
ISSN: 2409-3386  
E-ISSN: 2413-7316  
Vol. 6, Is. 4, pp. 374-395, 2015

DOI: 10.13187/bgt.2015.6.374  
[www.ejournal19.com](http://www.ejournal19.com)



UDC 631.874:631.559

## The Green Manure as a Factor of Agriculture Biologization and Nature-Similar Agrotechnology

Vladimir G. Loshakov

Institute of Agricultural Chemistry named after D.N. Pryanishnikov, Russian Federation  
Dr of Sc (Agriculture), Professor, Chief Scientist employee  
E-mail: LVG36@yandex.ru

### Abstract

The article analyzes the development of the Russian and global agriculture disclosed agrolandscape environmental problems, the role of green plants in the development of biosphere, soil formation and the main indicator of fertility – humus. The dark side is shown of man-made technologies, which have caused world environmental problems. Theoretically and experimentally proved the need for further development of agriculture on the basis of biologizing nature-similar agricultural technologies, one of which is green manure.

Based on the own long-term original research, and the research results of many scientific institutions in our country and abroad, is proposed the promising technology using green manure in relation to the specific soil and climatic conditions. The high agro-technical, agro-ecological, energy-saving and cost-effectiveness is shown of the coupled fallow, intercropping, second crop's green manure combined with straw on a background of mineral fertilizers. Optimal synthesis of biological and man-made nature-similar reproduction of soil fertility enhances crop yields and production of ecologically clean agricultural products. This determines the biogeosystem value of green manuring in environmentally sound agriculture, makes it possible to overcome the contradiction between development of modern agro-ecosystems and biosphere, draw through agriculture in the Earth's biosphere the extra energy to create additional biological substance.

**Keywords:** biosphere, green manure, coupled fallow, intercropping, second crops, humus, environmentally sound agriculture.

### Посвящается 150-летию Петровской земледельческой и лесной академии – Тимирязевки

### Введение

Одну из своих публичных лекций из цикла “Земледелие и физиология растений”, прочитанную в 1905 году, К.А. Тимирязев иллюстрировал словами короля лилипутов из сказки Джонатана Свифта «Путешествия Гулливера»: “Тот, кто сумел бы вырастить два колоса там, где прежде рос один, две былинки травы, где росла одна, заслужил бы благодарность всего человечества, оказал бы услугу своей стране более, чем все отродие политиканов, взятое вместе” [1].

Далее Климент Аркадьевич убедительно показал, что эта мечта, выраженная в

замечательном литературном произведении, в российском практическом земледелии может быть реализована только в том случае, если оно будет опираться на достижения агрономической науки и научно-технического прогресса.

С той знаменательной лекции К.А. Тимирязева минуло 110 лет, в течение которых, несмотря на две мировые войны, частые засухи, наводнения, другие социальные и природные катаклизмы земледелие нашей планеты преобразилось до неузнаваемости, достигнув высот, которые и не снились сказочным мечтателям.

Как и предсказывал великий естествоиспытатель, это стало возможным благодаря научно-техническому прогрессу и широкому использованию в практике земледелия достижений научной агрономии, позволивших увеличить продуктивность земледелия многократно.

И на этом пути прогресса можно отметить знаменательные вехи, отмечающие поступательное движение человечества к спасению от грозящего ему голода.

### **1. Научно-технический прогресс и экологические проблемы земледелия**

Еще на заре развития научного земледелия переход от средневекового трехполья к плодосменной системе земледелия позволил западноевропейским странам в течение одного столетия (1780–1880 гг.) увеличить урожайность озимой пшеницы с 7 ц/га до 15 ц/га [2].

Следующей вехой стала разработка технологий производства промышленных удобрений и широкое применение в практике земледелия азотных, фосфорных, калийных и других минеральных удобрений. И в последующий уже полувековой период (1880–1930 гг.) применение минеральных удобрений на фоне плодосменной системы земледелия позволило повысить урожайность пшеницы в этих странах до 30 ц/га, то есть вдвое. А суммарное увеличение производительности земледелия за полтора столетия стало четырехкратным.

Очередной вехой на пути развития мирового земледелия стала «зеленая революция», которая, начиная с 50-х годов прошлого столетия, последовательно охватила все континенты мира. Она выразилась в том, что достижения биологических наук позволили совершить прорыв в селекции сельскохозяйственных культур и повысить биологический потенциал и продуктивность новых сортов зерновых, технических, кормовых и других культур в несколько раз.

Параллельно с этим развитие химической и других смежных наук в дополнение к минеральным удобрениям поставило на службу земледелия еще один важный фактор его химизации – химические средства защиты растений от вредителей, болезней и сорняков, а также использование химических регуляторов роста растений.

Все это в сочетании с другими достижениями научно-технического прогресса позволило многим странам мира перейти в земледелии на интенсивные технологии и увеличить за послевоенные 70 лет производство зерна и другой растениеводческой продукции в 2–3 раза.

Потому, несмотря на то, что за это же время население планеты увеличилось с 2 млрд. до 7 млрд. человек, а площадь сельскохозяйственных угодий в расчете на 1 человека сократилась вдвое, глобального голода население нашей планеты не испытывает [3]. Хотя, по данным ФАО, в мире голодает около 300 млн. человек, и проблема продовольственной безопасности остается актуальной для многих стран [4].

Обеспечивая постоянно растущие потребности интенсивно развивающегося земледелия, мировой рынок минеральных удобрений за последние 50 лет увеличился практически в 5 раз, и его ежегодные объемы достигли более \$ 70 млрд. Ежегодное потребление минеральных удобрений в мировом земледелии в последние годы увеличилось до 190 млн. тонн в пересчете на содержание питательных веществ [8].

Как и во всем мире, в нашей стране накануне реформирования аграрно-промышленного комплекса (АПК) в конце 80-х гг. земледелие носило техногенный характер.

Во второй половине XX века при широкой химизации земледелия воспроизводство плодородия почвы в Российской Федерации осуществлялось, главным образом, за счет минеральных удобрений, применение которых за период с 1965 по 1990 год увеличилось с 20 кг до 88 кг питательных веществ на 1 га посевной площади [15].

В интегрированной системе защиты растений от вредителей, болезней и сорняков, в оптимизации условий вегетации сельскохозяйственных растений большую роль играли пестициды, регуляторы роста и другие химические препараты, которыми до 1990 года обрабатывалась большая часть посевной площади страны [7, 9].

В этих условиях стали возможными специализация земледелия и применение интенсивных технологий возделывания основных видов сельскохозяйственных культур в рамках научно обоснованных зональных систем земледелия, которые были разработаны и внедрены в нашей стране в сельскохозяйственное производство в 1970–1980-х гг. прошлого столетия. Они сыграли положительную роль в развитии земледелия Советского Союза [3, 5].

Однако за достижения научно-технического прогресса в земледелии приходится платить экологическими потерями, как в глобальном масштабе, так и в масштабе нашей страны. Это высокая цена технологической активности, так как одновременно с интенсификацией и специализацией земледелия на техногенной основе в АПК развивались и негативные процессы – загрязнение почвы, грунтовых вод и водоемов остаточными веществами минеральных удобрений, пестицидов, тяжелыми металлами, метаболитами, продуктами разрушения почвы водной и ветровой эрозией [6, 12, 14].

Специализация земледелия породила угрозу массового засорения полей сорняками и поражения посевов сельскохозяйственных культур вредителями и болезнями [8]. Для предотвращения этой угрозы в 1990 году в Российской Федерации пестицидами было обработано 81 млн. га посевной площади.

Но несмотря на совершенствование мер защиты растений, повышение затрат на применение пестицидов, последние несколько десятилетий стоимость потерь от поражения растений вредными организмами остается практически неизменной и по-прежнему составляет около 30 % от стоимости растениеводческой продукции, производимой в мире. В то же время произошло усиление так называемой пестицидной нагрузки на поля, что еще больше усугубило ситуацию в сфере охраны окружающей среды [4, 7, 10].

В 90-е годы прошлого столетия в результате спада сельскохозяйственного производства применение пестицидов в нашей стране уменьшилась в несколько раз – уже к 1993 году площадь посевов, обработанных пестицидами, составила лишь 31 млн. га [9], в несколько раз снизилось применение минеральных удобрений – до 17 кг/га в 1995 году против 88 кг/га в 1990 году [15].

Но, несмотря на резкое падение уровня химизации земледелия, оно не стало от этого экологически более безопасным, и экологические проблемы стали серьезным препятствием на пути дальнейшего развития сельского хозяйства, создали реальные угрозы для среды обитания человека в нашей стране и за рубежом [3, 10, 11].

В Московской, Ленинградской и в других промышленных зонах Центра России, в бассейнах крупных рек европейской части нашей страны антропогенная нагрузка уже давно превысила установленные нормативы. Практически все поверхностные источники водоснабжения в этом регионе подвергаются загрязнению. Экологическое состояние бассейнов крупнейших рек – Волги, Оки, Москвы-реки и их притоков оценивается как «загрязненное» или «сильно загрязненное» [11, 13]. При этом дополнительная опасность исходит от самих нормативов контроля качества окружающей среды, поскольку они далеки от совершенства.

Крупнейшие водные артерии Западной Европы Рейн, Дунай, Темза, Одер, Эльба, Сена и другие уже десятки лет подвергаются избыточному загрязнению и превратились в сточные каналы для этого континента [8, 10]. И лишь в последнее время в Европе в результате активной позиции гражданского общества наметилась тенденция к преодолению загрязнения водных и наземных экосистем.

Тем не менее, тревога по поводу состояния окружающей среды остается актуальной, и она в значительной степени связана с производственной деятельностью АПК.

В нашей стране 125 млн. га сельскохозяйственных угодий, или 60 % их общей площади, находятся в районах проявления водной и ветровой эрозии. Из них 58 млн. га подвержено эрозии, в результате чего утрачена значительная часть самого плодородного – гумусового слоя почвы, и урожайность полей на таких почвах снижается на 30–70 %. Оврагами разрушено около 1,5 млн. га. [12].

Водная и ветровая эрозия не только уничтожает самую плодородную часть почвы и



приводит к большим потерям урожая. Она является прямым источником загрязнения окружающей среды, причиной нарушения экологического равновесия в агроландшафтах. Продукты эрозионного разрушения почвы – различные химические соединения – загрязняют реки, озера, луга и пастбища, отравляют грунтовые воды.

Например, только в Центральном экономическом районе в разной степени эродировано 2,5 млн. га или около 20 % площади пахотных земель, и годовой смыв почвы составляет 21,8 млн. тонн или 6 т/га, с которым с полей отчуждается 16,5 тыс. тонн азота, 13,6 тыс. тонн фосфора, 225,1 тыс. тонн калия и много других химических веществ [13].

Такая ситуация в АПК нашей страны связана прежде всего с экологической неграмотностью тех, кто работает на земле, с низкой культурой земледелия, когда игнорируются мероприятия по защите почвы от эрозии, а сельскохозяйственных растений – от вредителей, болезней и сорняков, не соблюдаются правила хранения и использования минеральных удобрений, пестицидов и других средств химизации в земледелии, нарушаются севообороты и технология обработки почвы.

Это является также результатом того, что со стороны государства ослаблен, а в ряде случаев утрачен контроль за соблюдением технологической дисциплины в АПК, за соблюдением законодательных актов о рациональном использовании земли и защите ее от эрозии.

## **2. Воспроизводство плодородия почвы – животрепещущая проблема современного земледелия России**

Сохранение почвы, воспроизводство ее плодородия является одной из ключевых проблем современного земледелия, от решения которой зависит дальнейшее развитие аграрно-промышленного комплекса, будущее сельского социума и продовольственная безопасность страны. Это особенно актуально в связи с тем, что за годы реформирования АПК в постсоветский период во многих регионах России наметилась тенденция к снижению почвенного плодородия [14, 15].

Низкий уровень плодородия почвы является причиной неустойчивости земледелия нашей страны, которое в случае неблагоприятных погодных условий (засуха, заморозки, избыточное увлажнение и т.п.) часто несет большие потери и недобирает десятки млн. т зерна и другой сельскохозяйственной продукции.

Государственная комплексная (1992–2000 гг.) и Федеральные целевые (2002–2005 и 2006–2012 гг.) программы повышения плодородия почв России были призваны не только предотвратить снижение плодородия почвы, но и, стабилизировав его, создать предпосылки для его расширенного воспроизводства и оздоровления экологической обстановки в агроландшафтах [14, 15]. Однако из-за недостаточного финансирования, из-за утраты сложившейся инфраструктуры агрохимического обслуживания АПК, по ряду других причин кризисного характера эти научно обоснованные программы и рекомендации не были выполнены, и земледелие страны из года в год остается при отрицательном балансе питательных веществ – в среднем минус 70 кг /га NPK в год [15].

Одновременно ежегодные потери гумуса в пахотном слое за последние годы в среднем по России составляют 0,52 т/га и по отдельным регионам изменяются от 0,25 до 0,72 т/га. В настоящее время в России 56 млн. га пашни (45 %) характеризуется низким содержанием гумуса, 28 млн. га (23 %) – дефицитом фосфора и 11,5 млн. га (9 %) – дефицитом калия [16].

Снижение плодородия почвы стало главной причиной не соответствия между потенциальной и фактической продуктивностью современных сортов сельскохозяйственных культур. Уровень фактической урожайности современных сортов в производственных условиях нашей страны, как правило, не превышает 30–40 % от заложенного селекционерами потенциала их урожайности [6].

Такое падение уровня плодородия почв связано с тем, что за годы реформирования АПК в земледелии России в несколько раз уменьшилось применение минеральных удобрений и сложился острый дефицит органических удобрений – их применение за это время снизилось в 4 раза и в среднем по стране опустилось до 0,9 т условного навоза на 1 га пашни [18].

Недостаток органических удобрений отрицательно сказывается не только на балансе гумуса и питательных веществ, но и негативно проявляется на жизни почвы, на ее биоте, на

биологической активности почвенной среды, в которой обитает сельскохозяйственное растение.

Органические удобрения и растительные остатки в почве являются источником энергии, которой наполнен гумус – основной показатель плодородия почвы [1, 14, 21].

Почва с ее плодородием является биокосным телом, занимающим особое место в биосфере нашей планеты. По В.И. Вернадскому почва – это область наивысшей геохимической энергии живого вещества, важнейшая по своим геохимическим последствиям лаборатория с идущими в ней химическими, биохимическими и биологическими процессами [21].

Почва является той средой, без которой в природе немислима жизнь растений, реализующих одно из величайших изобретений природы – процесс фотосинтеза, сопровождаемый образованием и накоплением в верхней части земной оболочки органического вещества – хранителя солнечной энергии.

Раскрывая тайны фотосинтеза, К.А. Тимирязев считал, что зеленые растения играют в жизни Земли космическую роль, так как благодаря им возникла и развивается биосфера на нашей планете. По его словам, растение – посредник между небом и землей. Оно – «истинный Прометей, похитивший огонь с неба. И похищенный им луч солнца горит и в мерцающей лучине, и в ослепительной искре электричества» [1].

Роль почвы в глобальных биосферных явлениях и процессах в значительной степени определяется режимом формирования и обновления различных групп органических веществ, знание которых является решающим для успеха управления плодородием почвы.

Современная агрономическая наука располагает такими знаниями и приемами регулирования процессов формирования гумуса в почве, источником которого являются растительные остатки и органические удобрения [14, 19, 20]. И хотя это знание старо как мир, на современном этапе развития научно-технического прогресса в земледелии оно пополняется новыми идеями, знаниями и приемами из области природоподобных технологий [27]. Одним из таких приемов, точнее комплексом приемов является сидерация [2, 3, 14, 22, 23, 32, 31, 37, 39].

### **3. Сущность и значение сидерации в современном земледелии**

В современной агрономической литературе сидерация определяется как группа агротехнических приемов, при которых для повышения плодородия почвы и урожая сельскохозяйственных культур в почву в качестве органического удобрения запахивают зеленую массу посеянных для этих целей сидеральных культур – сидератов [2, 3, 14, 22–26, 30].

Термин «сидерация», предложенный во второй половине XIX века французским ученым Ж. Вилем, в переводе с латинского языка означает «звездный» – *sideris* [22, 24, 30]. Можно предположить, что этот термин связан с похожей на звезду формой листа люпина – самой древней и самой распространенной сидеральной культуры. Однако в ряде фундаментальных работ, посвященных сидерации, этот термин определяется как «лучистый», «солнечный», и рассматривается как относящийся к небесным светилам, что подчеркивает космическую роль сидеральных растений [1, 22–24].

Именно такое значение придавали зеленым растениям К.А. Тимирязев, В.А. Вернадский [1, 21]. Они обосновывали это тем, что зеленые растения поглощают кинетическую энергию солнца и превращают ее в потенциальную энергию органического вещества. Без этой энергии немисливо существование всего живого на земле, так как она находится в составе пищевых продуктов, которыми питается человек, в составе кормов сельскохозяйственных и диких животных, ею насыщены все органические вещества растительного происхождения. И, наконец, эта энергия заключена в почвенном гумусе – основном носителе плодородия, что уже отмечалось выше [14, 19, 21, 22].

И поскольку основой зеленого удобрения является живое растение, то такая форма органического удобрения в наибольшей степени приближается к природоподобным, биологизированным технологиям, призванным успешно решать непростые задачи обустройства нового многогранного и стабильного мира [3, 18, 27, 31]. Это связано, прежде всего, с тем, что в создании зеленого удобрения – сидератов решающая роль принадлежит творению живой природы – вегетирующим растениям, поставляющим постоянно возобновляемый источник энергии – органическое вещество.

Другой особенностью этого возобновляемого источника энергии является то, что химический состав органической массы сидератов и соотношение питательных веществ в ней очень близки и подобны аналогичным показателям у основных сельскохозяйственных культур, что определяет ее соответствие потребности растений этих культур в основных элементах питания [18, 23, 25, 26, 28, 29].

Зеленое удобрение, с одной стороны, является важным источником органического вещества с заключенной в нем потенциальной солнечной энергией и питательными веществами. Оно является полноценной заменой навоза, и в сочетании с минеральными и известковыми удобрениями является эффективным средством оптимизации питания, условий роста и развития сельскохозяйственных растений [2, 22, 23, 30, 37, 41, 45].

Но с другой стороны, зеленое удобрение является фактором биологизации и экологизации земледелия, приближающим его к природоподобным агротехнологиям. Это постольку, поскольку основные запасы питательных веществ в составе сидеральных растений находятся в виде органического вещества, которое не вымывается из почвы, и потому безопасно для окружающей среды [3, 22, 36].

Сидерация имеет биогеосистемотехническое значение, так как она определяет оптимальное сочетание биологических и техногенных факторов воспроизводства плодородия почвы в экологически безопасном земледелии. Это позволяет преодолеть противоречия между развитием современных агроэкосистем и биосферой, которые возникли в последние десятилетия и приобрели планетарное экологическое значение [3, 22, 35, 40, 43, 44].

Доступность сравнительно дешевого зеленого удобрения – «навоза, растущего на поле» – делает его привлекательной и перспективной формой органического удобрения, способного совместно с минеральными удобрениями, соломой и другими растительными остатками значительно уменьшить дефицит органических удобрений, сократить дисбаланс между выносом и поступлением питательных веществ в почву в [18, 22, 23, 26, 28, 41, 42, 45, 46].

В соответствии с «Концепцией развития агрохимии и агрохимического обслуживания сельского хозяйства Российской Федерации до 2020 года», разработанной учеными ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, при сложившейся структуре посевных площадей сидераты могли бы занимать в нашей стране до 30 млн. га и давать зеленое удобрение, равноценное по содержанию органического вещества 700–800 млн. т подстилочного навоза [15]. При этом затраты на производство и использование зеленого удобрения в 3–4 раза меньше применения подстилочного навоза. Сидеральные пары, являясь важным элементом плодосмена, снижают потери азота и повышают продуктивность севооборотов.

Наряду с решением задачи воспроизводства плодородия почвы зеленое удобрение позволяет решить целый ряд других актуальных задач современного земледелия: рациональное использование питательных веществ минеральных удобрений и почвы, биологизация и экологизация земледелия, защита почвы от эрозии, охрана окружающей среды, снижение пестицидной нагрузки и оздоровление агрофитоценозов, и сохранение экологического равновесия в агроландшафтах и др. [14, 22, 23, 29].

Все это в совокупности определяет большое агротехническое и агроэкологическое значение зеленого удобрения для стабильного повышения урожайности сельскохозяйственных культур и устойчивости земледелия против неблагоприятных погодных условий, а также высокую рыночную конкурентоспособность производителей сельскохозяйственной продукции с различными формами собственности на землю.

Ярким примером широкого и эффективного использования зеленого удобрения в практике земледелия является опыт Белгородской области, где ежегодно в занятых парах и в промежуточных посевах на площади более 300 тыс. га используют сидераты в сочетании с жидким навозом и удобрением соломой. Сочетание этой формы органических удобрений с минеральными и известковыми удобрениями позволило превзойти показатели плодородия почвы в области конца 80-х гг. прошлого столетия и обеспечить стабильность растениеводческих и животноводческих отраслей АПК, по развитию которых Белгородская область занимает одно из первых мест в России.

В качестве сидератов могут быть использованы различные виды однолетнего люпина – желтый, белый, синий (узколистный), а также многолетний люпин, вика, горох, бобы, пелюшка, эспарцет, сераделла, донник белый и желтый, клевер, люцерна и другие бобовые

культуры [22, 23].

Помимо накопления органического вещества бобовые культуры способны с помощью клубеньковых микроорганизмов обогащать почву азотом. Поселяясь на корнях бобовых растений, микроорганизмы синтезируют за лето из атмосферного воздуха до 150–200 кг/га чистого азота. Это равноценно 5–6 центнерам дорогостоящей промышленной азотной селитры.

Сидераты дают такое количество органической массы, которое может заменить достаточно высокие дозы навоза и других органических удобрений. Например, люпин синий – узколиственный – один из лучших сидератов для песчаных и супесчаных почв, дает по 40–50 тонн на 1 га зеленой массы плюс 10–15 тонн корней, итого до 50–65 т/га органической массы, которая по удобрительной ценности не уступает основным видам навоза (табл. 1).

Помимо азота зеленая и корневая масса сидератов богата фосфором, калием, кальцием, микроэлементами и в таком соотношении, которое необходимо для нормального роста и развития основных сельскохозяйственных культур. И что очень ценно – эти питательные вещества находятся в составе органической массы, запахиваемой в почву.

Поэтому они не вымываются из почвы, как это часто происходит с минеральными удобрениями, например, при промывном водном режиме Нечерноземной зоны или на орошаемых землях. А это очень важно не только с позиций питания сельскохозяйственных растений, но и с позиций экологии – значительно уменьшается угроза загрязнения грунтовых вод и водоемов нитратными и другими вредными веществами.

Таблица 1

Содержание питательных веществ в различных видах органических удобрений (%) [22]

Вид удобрений, сидераты	Содержание питательных веществ, %			
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO
Навоз крупного рогатого скота	0,45	0,25	0,55	0,10
Навоз конский	0,58	0,28	0,53	0,30
Навоз овечий	0,85	0,25	0,67	0,30
Навоз свиной	0,45	0,19	0,55	0,05
Торф низинный	0,40	0,04	0,01	0,60
Торф верховой	0,20	0,01	0,01	0,05
Люпин однолетний	0,45	0,10	0,17	0,47
Люпин многолетний	0,37	0,08	0,21	0,38
Донник белый	0,77	0,05	0,19	0,67
Сераделла	0,49	0,18	0,44	0,32
Пелюшка:	0,53	0,16	0,48	0,30
Горчица белая:	0,30	0,08	0,26	0,46
Рапс яровой:	0,45	0,16	0,54	0,40
Рапс озимый:	0,36	0,12	0,56	0,32
Фацелия	0,34	0,13	0,45	0,39

Многие сидераты (люпин, донник и другие) имеют глубоко проникающую корневую систему, и поэтому помимо засухоустойчивости обладают способностью извлекать из глубоких слоев почвы питательные вещества и перераспределять их в пахотный слой. Это позволяют люпину и другим сидератам формировать большую – до 50–60 т/га – вегетативную массу высокой удобрительной ценности [22, 29, 30].

Еще одним не менее ценным свойством люпина, и других бобовых сидератов является их способность с помощью корневых выделений растворять трудно растворимые соединения фосфатов почвы, превращая их в доступные для растений окислы фосфора. За способность синтезировать азот воздуха и вовлекать в круговорот питательных веществ трудно-растворимые фосфаты почвы Д.Н. Прянишников называл растения люпина и все бобовые сидераты живыми азотно-фосфатными фабриками [2].

Запаханная в почву органическая масса сидератов подвергается разложению почвенными микроорганизмами. Наиболее интенсивное разложение сидерата в почве

приходится на первую половину лета, когда происходит наибольшее потребление питательных веществ интенсивно растущими сельскохозяйственными растениями [22, 24, 26].

Такое совпадение по срокам наибольшего поступления питательных веществ в почвенно-поглощительный комплекс и их максимального потребления быстро растущими сельскохозяйственными растениями имеет большое агроэкологическое значение, так как исключает чрезмерное накопление питательных веществ в почве с последующим их вымыванием в грунтовые воды.

Тем самым обеспечивается наиболее высокий коэффициент использования питательных веществ экологически безопасного зеленого удобрения. Интенсивно разлагаясь «в нужное время и в нужном месте», зеленое удобрение является источником растворимых питательных веществ – азота, фосфора, калия, кальция и других в период наиболее интенсивного роста основных сельскохозяйственных культур.

В этот период идет наиболее активное поглощение высвобождающихся питательных веществ корневой системой быстро растущих сельскохозяйственных культур без избыточного накопления их остатков в почве, опасного для окружающей среды. С этих позиций экологически эффективным является пропускание минеральных удобрений через вегетативную массу сидеральных растений, когда предназначенные, например, для пшеницы минеральные удобрения вносятся под сидеральное растение, выращиваемое на зеленое удобрение под эту культуру [3, 14, 22, 26, 29, 31].

Другое преимущество зеленого удобрения имеет организационно-экономический характер. Оно заключается в том, что в отличие от навоза, торфа и других органических удобрений, зеленое удобрение не надо вывозить и разбрасывать по полю. Оно обычно выращивается на том месте, на том поле, где почва нуждается в органическом удобрении, то есть «навоз растет на поле».

Таким образом, исключаются дорогостоящие операции по транспортировке и распределению по полю навоза и других обычных органических удобрений, что делает зеленое удобрение экономически эффективным способом обогащения почвы органическим веществом. При этом важна и качественная сторона применения зеленого удобрения – никакой навозоразбрасыватель или ему подобная машина не сможет обеспечить такого равномерного распределения органического удобрения по полю, как это достигается при использовании сидератов.

#### **4. Зеленое удобрение в занятых парах**

В севооборотах Нечерноземной зоны, в других районах достаточного увлажнения, на орошаемых землях сидераты чаще всего возделывают в занятых парах, которые в этом случае становятся сидеральными парами – лучшими предшественниками озимых зерновых и других культур. Начиная с первых опытов с зеленым удобрением в России в конце XIX века и кончая широким применением зеленого удобрения в различных почвенно-климатических зонах России в наши дни, именно такое место в севообороте определяет наиболее эффективное использование зеленого удобрения [14, 22].

Однако большая часть используемых пахотных земель в нашей стране расположена в районах недостаточного увлажнения и с крайне засушливыми условиями, где устойчивость земледелия обеспечивается лишь при использовании чистых паров. Поэтому занятые сидеральные пары прежде всего – элемент систем земледелия в районах достаточного увлажнения.

Запашку зеленой массы люпина и других сидератов в занятом пару проводят в момент наибольшего накопления зеленой массы. Обычно это фаза цветения – начало формирования генеративных органов. Однако запашка зеленой массы должна проводиться не позже чем за 2–3 недели до посева озимых культур на легких – песчаных и супесчаных почвах, и за 3–4 недели – на связных – глинистых и суглинистых почвах [14, 25].

Запашка зеленого удобрения в занятом пару непосредственно перед посевом озимых и других культур не желательна, так как чревата сильным изреживанием посевов этих культур. Это происходит в результате ингибирующего воздействия продуктов разложения свежей зеленой массы сидерата на проростки зерновых культур. Кроме того, изреживание посевов озимых культур в этом случае происходит также в результате разрыва первичных корешков растений озимых культур в процессе быстрого оседания рыхлой почвы.

Для своевременной и высококачественной предпосевной подготовки почвы под озимые зерновые культуры важна тщательная, на всю глубину пахотного слоя, заделка зеленой массы сидерата. Это достигается с помощью вспашки отвальным плугом на глубину пахотного слоя с предварительным прикатыванием и измельчением зеленой массы сидерата перекрестным дискованием.

При недостаточно глубокой заделке зеленой массы возможно ее выдергивание культиваторами на поверхность почвы, что не только снижает эффект сидерации, но и не позволит провести качественный посев озимых культур. В случае возникновения такой опасности при предпосевной подготовке почвы следует заменить паровые культиваторы дисковыми боронами.

Хорошие результаты дает также измельчение сидеральной массы перед ее заашкой с помощью роторной косилки типа КИР-1,5, которую для этих целей переоборудуют – снимают направляющие трубы и закрывают листом железа отверстие над барабаном.

Зеленое удобрение, содержащее в своем составе все питательные вещества, необходимые сельскохозяйственным растениям, оказывает положительное комплексное воздействие на основные показатели плодородия почвы.

Под влиянием зеленого удобрения в несколько раз повышается биологическая активность почвы, бурно развивается так называемая сапрофитная микрофлора почвы, которая активно разлагает растительные остатки с выделением в почвенный раствор окислов азота, фосфора, калия, кальция и других питательных веществ [22, 23, 26, 28, 29, 32, 37].

Кроме того, сапрофитная микрофлора почвы является антагонистом грибной микрофлоры почвы, среди которой много возбудителей болезней растений, таких как корневые гнили зерновых культур, фитофтороз картофеля, томата, фузариоз льна-долгунца и другие.

Лучшие условия жизни, создаваемые зеленым удобрением для культурных растений, обеспечивают последним большую конкурентную способность против сорных растений. В результате этого сидерация снижает засоренность посевов сельскохозяйственных культур на 30–60 % при одновременном снижении запаса семян сорняков в пахотном слое почвы.

Улучшение условий питания, снижение пораженности болезнями, вредителями, уменьшение засоренности посевов под влиянием сидерации обеспечивают хороший рост и развитие культурных растений, в результате чего они дают такие же урожаи, как и при внесении больших доз навоза.

По данным Новозыбковской опытной станции, Судогодского опытного поля, ВНИИОУ, других научных учреждений Нечерноземной зоны заашка узколистного люпина в сидеральных парах под озимые зерновые культуры на супесчаных почвах повышает урожай зерна на 25–30 % [22, 30, 31].

В среднем по Нечерноземной зоне сидеральный пар, занятый многолетним люпином, обеспечивал прибавку урожая зерна озимой ржи от 0,35 до 1,7 т/га [22].

По обобщенным данным К.И. Довбана сидеральный пар в условиях Белоруссии обеспечивает следующие прибавки урожайности: зерновых культур – 0,4–1,5 т/га, картофеля 5–9, сахарной свеклы 5–14, зеленой массы кукурузы 7–13, гречихи 0,6–1,0 т/га [23]. Однако действие сидерата в занятом пару этим не ограничивается, и прослеживается на последующих культурах севооборота. Так, в опытах с люпином Судогодского опытного поля Новозыбковской опытной станции урожай картофеля, идущего в севообороте после озимой ржи, удобренной сидератом, увеличивался на 12–15 %. В опытах ВНИИ органических удобрений общая прибавка урожая зерна после сидерального пара в севооборотном звене озимая пшеница, ячмень, овес составила 2,9 т/га [31].

Зеленое удобрение с таким же высоким эффектом может быть использовано под картофель и другие пропашные культуры, как в полевых, так и в кормовых и специальных севооборотах – прифермских, овощных, земляничных, плодово-питомнических и других севооборотах [14, 22, 30]

Одновременно с этим сидерация через улучшение фитосанитарной ситуации на полях снимает необходимость широкого использования фунгицидов, инсектицидов, гербицидов. Такое снижение пестицидной нагрузки имеет большое экологическое значение. С учетом высокой стоимости пестицидов это экономически значимо.

Применение сидератов в занятых сидеральных парах имеет недостаток – в год

парования поля оно «ни вершков, ни корешков» не дает, так как нет урожая основных культур. Тем не менее, наши почвы часто настолько истощены, что "отдых" в виде сидеральных паров им необходим, без него невозможно дальнейшее использование земли как незаменимого основного средства производства в земледелии.

### 5. Промежуточная форма сидерации

Наряду с сидеральными занятыми парами существует и другая форма сидерации, которая позволяет применять зеленое удобрение в севообороте не только без ущерба для урожая основных культур севооборота, но и с его прибавкой. Это достигается при использовании на зеленое удобрение посевов промежуточных культур.

Промежуточными называют культуры, которые возделываются на пашне в промежутки теплого времени года, свободный от возделывания основных культур севооборота. В зависимости от сроков сева и использования промежуточные культуры могут быть *пожнивными, поукосными, подсевными и озимыми промежуточными* [14, 22].

Возможность возделывания пожнивных, поукосных и других промежуточных культур в современных севооборотах связана с тем, что многие сельскохозяйственные культуры недостаточно полно используют агроклиматические ресурсы теплого времени года. Например, даже в Нечерноземной зоне после уборки урожая зерновых культур, занимающих в хозяйствах до 60 % площади пашни, агроклиматические ресурсы используются лишь на 60–70 %.

Биология зерновых культур такова, что они формируют урожай и достигают полной спелости зерна за 3–3,5 летних месяца. И после их уборки до наступления устойчивого похолодания остается 2–2,5 месяца теплого времени, часто обеспеченного теплом и атмосферными осадками в количестве, необходимом для выращивания пожнивных и других промежуточных культур.

Значительное количество тепла и атмосферных осадков не используется и в весенний период до посева и посадки поздних яровых культур – кукурузы, картофеля и других. По поводу таких непроизводительных потерь тепла и других агроклиматических ресурсов К.А.Тимирязев писал: “Каждый луч солнца, не уловленный зеленой поверхностью поля, луга или леса – богатство, потерянное навсегда, и за растрату которого более просвещенный потомок осудит своего невежественного предка” [1].

Чтобы не уподобляться тому “невежественному предку”, каждый земледелец должен стремиться к наиболее полному использованию земли и агроклиматических ресурсов – энергии солнечного луча и атмосферных осадков.

Вопросам рационального использования пашни и агроклиматических ресурсов с помощью промежуточных культур в центральных областях Нечерноземной зоны с целью повышения плодородия дерново-подзолистых почв автор этих строк посвятил более 50 лет своей научно-исследовательской и внедренческой работы [3, 5, 14, 22, 25, 26, 28, 29, 36, 39].

Результаты наших многолетних исследований в Тимирязевской сельскохозяйственной академии, исследования других научных учреждений и производственный опыт показывают, что при наличии необходимой материально-технической базы (техника, семена, удобрения и др.) агроклиматические ресурсы и пашня в различных севооборотах наиболее полно могут быть использованы посредством посева различных видов промежуточных культур [22, 25, 26, 28, 29].

Посевы промежуточных культур часто используются для укрепления кормовой базы животноводства, воспроизводства плодородия почвы через дополнительное поступление навоза на поля. При необходимости посевы пожнивных культур могут быть использованы и на зеленое удобрение по аналогии с тем, как это делается в сидеральном пару с использованием люпина и других бобовых сидератов.

Однако набор пожнивных, поукосных и других промежуточных сидератов, например, в Нечерноземной зоне будет несколько иным, чем в сидеральных парах. Это из-за того, что посевы бобовых культур при пожнивных посевах в этой зоне часто не удаются – они долго всходят, медленно растут, повреждаются ранне-осенними заморозками, и до наступления холодов не успевают дать сколь либо значительный урожай зеленой массы, оправдывающий затраты на их возделывание [25, 28].

Но совершенно по-иному ведут себя при посеве во второй половине лета культуры из семейства капустовых: горчица белая (*Sinapis alba* L.), яровой и озимый рапс (*Brassica napus* L., ssp. *oleifera* Metzger), турнепс (*Brassica rapa* L., ssp. *rapifera* Metzger), редька масличная (*Raphanus sativus* L., var *oleifera* Metzger), сурепица озимая (*Brassica campestris* L.). При посеве в начале августа они быстро дают дружные всходы, хорошо растут и переносят кратковременные осенние заморозки в диапазоне температур от  $-4$  до  $-6^{\circ}\text{C}$ , и до наступления устойчивого похолодания успевают дать в среднем по 18–20 т/га зеленой массы. Это позволяет получать дополнительно к урожаю зерна еще 2–2,5 т/га кормовых единиц, увеличив продуктивность пашни на 30–40 % при относительно низкой себестоимости корма, так как затраты на посев этих мелкосемянных культур незначительны. Семеноводство горчицы белой и других культур семейства капустовых возможно в большинстве областей Нечерноземной зоны при коэффициенте размножения 70–100 и более.

Наши многолетние исследования в Тимирязевской сельскохозяйственной академии показали, что в центральных областях Нечерноземья для пожнивной сидерации наиболее пригодными являются пожнивныя посева горчицы белой (*Sinapis alba* L.)

В отдельные годы с хорошим обеспечением осени осадками и теплом горчица белая, высеянная в начале августа сразу после уборки озимой пшеницы или озимой ржи, к концу сентября зацветала и давала по 27–30 т/га зеленой массы высокой кормовой и удобрительной ценности. Горчица белая лучше, чем другие капустные растения переносит кратковременные осенние засухи и понижения температуры.

При изучении способов использования белой горчицы как сидерата в учхозе МСХА имени К.А. Тимирязева «Михайловское» были годы, когда цветущие растения пожнивного посева горчицы в начале октября попадали под заморозок до минус 6 градусов и покрывались слоем снега. Но с возвращением теплой погоды снег таял, и горчица, как ни в чем не бывало, еще в течение 1–2 недель продолжала вегетацию. Это сходно с той ситуацией, в которую обычно поздней осенью попадают позднеспелые сорта белокочанной капусты [25].

Зеленая масса горчицы обладает хорошими молокогонными свойствами, и, например, в Германии, в других западноевропейских странах пожнивныя посева белой горчицы в фазу цветения часто используют как пастбищный корм для крупного рогатого скота с последующей заправкой остатков пастбищного корма как зеленого удобрения в почву [22, 25, 26, 43, 44].

После цветения зеленая масса горчицы белой грубеет, в образовавшихся семенах идет накопление горчичных и эфирных масел, и она не пригодна для скармливания скоту. Горчица белая является хорошим медоносом, и при теплой сентябрьской погоде в фазу цветения ее пожнивный посев охотно посещается пчелами.

Во влажные годы высокие урожаи зеленой массы дают также пожнивныя посева фацелии, которая в отличие от горчицы белой при пожнивном посеве в условиях Нечерноземной зоны не достигает фазы цветения, но ее зеленая масса имеет высокую удобрительную ценность.

## 6. Технология возделывания пожнивных сидератов

Технология возделывания пожнивных сидератов хорошо вписывается в современную технологию возделывания основных культур севооборота. Например, большинство полевых севооборотов Нечерноземной зоны построены на принципах плодосмена, при которых на полях постоянно чередуются зерновые и пропашные культуры, бобовые и злаковые, озимые и яровые культуры, многолетние и однолетние растения и т.д. [14] В таких севооборотах обычно после озимых зерновых культур идут яровые пропашные или зерновые культуры, и в промежутке времени между ними пожнивныя культуры хорошо вписываются в систему зяблевой обработки почвы.

Промежуточные сидераты из растений семейства капустовых можно размещать после рано убираемых зерновых, а также кормовых и овощных – зеленных и других культур, как на больших плантациях, так и в условиях фермерских хозяйств.

Однако промежуточные культуры из семейства капустовых нельзя возделывать после и перед культурами из того же семейства из-за опасности распространения специализированных вредителей и болезней, поражающих эти растения этого семейства.



Это точно также, как нельзя возделывать мятликовые после мятликовых растений, пасленовые после пасленовых, зонтичные после зонтичных и т.д.

Ограниченность периода возможной вегетации растений при возделывании пожнивных культур предъявляет повышенные требования к технологии их возделывания. Прежде всего, эти культуры следует сеять как можно раньше – сразу же после уборки предшествующей основной культуры. Установлено, что в центральных областях Нечерноземной зоны наибольший урожай пожнивных посевов горчицы белой дают при посеве не позже первой декады августа.

Результаты наших исследований показали, что запаздывание со сроками пожнивного посева этой культуры на 10–12 дней приводило к снижению урожая зеленой массы с 22 до 9 т/га [22, 25, 36].

Поэтому все предпосевные работы и посев пожнивных культур необходимо проводить в сжатые сроки. Для этой цели особенно пригодны различные комбинированные агрегаты, позволяющие совместить операции по обработке, удобрению почвы и посеву. Особенно большое значение имеют сроки сева для озимого рапса и озимой сурепицы. Они лучше зимуют, если их высевают на две недели раньше оптимальных сроков посева озимых зерновых культур.

Высокая урожайность зеленой массы как пожнивных, так и других промежуточных культур на малоплодородных почвах Нечерноземья возможна лишь при внесении минеральных удобрений, особенно азотных, на которые капустовые культуры отзываются быстрым ростом и высокой урожайностью.

Например, на суглинистых почвах Подмосковья внесение 45 кг/га действующего вещества азота (125 кг/га аммиачной селитры) повышало урожай зеленой массы пожливной горчицы, посеянной по луцению стерни, на 44 %.

На фоне такого же количества фосфорно-калийных удобрений эта же доза азота повышала урожай пожливной горчицы на 56 %. Минеральные удобрения вносят под предпосевную обработку почвы.

При посеве пожливных культур норму высева семян следует увеличивать против весенних сроков сева на 25–30 %. Для горчицы белой она должна составлять 30–35 кг/га при ширине междурядий 15 см., для рапса 15–18 кг/га при ширине междурядий 30 см. Эти культуры имеют мелкие семена, которые при посеве заделывают в хорошо разделанную почву на глубину 2–3 см. с прикатыванием, но с некоторым заглублением на легких почвах и в сухую погоду.

Установлено, что наибольший агроэкологический и экономический эффект дает использование пожливного сидерата в сочетании с удобрением соломой озимых культур.

В связи с этим уборку озимой ржи или пшеницы проводят комбайнами с соломоизмельчителями, оставляющими измельченную солому (от 4 до 6 т/га) на поверхности поля. Сразу же после уборки зерновых культур, не теряя ни одного дня, вносят 1–1,5 ц/га аммиачной селитры, и вместе с измельченной соломой немедленно заделывают ее в почву перекрестным дисковым луцением в 2–3 следа на глубину 8–10 см.

Внесенное азотное удобрение является стартовой дозой удобрения, необходимого для хорошего роста пожливного сидерата. Одновременно азотное удобрение оптимизирует соотношение между углеродом и азотом в органической массе соломы, которая бедна азотом, и внесение в почву соломы без азотного удобрения вызывает иммобилизацию запасов почвенного азота.

Дискование стерни является составной частью системы зяблевой обработки почвы. Сразу же после дискования проводят посев пожливной культуры, которая после появления всходов вегетирует до середины октября и запахивается в почву при основной обработке почвы – зяблевой вспашке под последующую яровую культуру.

Минеральные удобрения – азотные и другие, внесенные под пожливный сидерат, являются частью удобрений, предназначенных под последующие культуры севооборота, и их перевод в органическую форму сидерата и экологически, и экономически оправдан. По данным наших исследований это позволяет повысить коэффициент использования азота минеральных удобрений на 40–50 % [22, 36].

При использовании пожливных сидератов из семейства капустовых всегда возникает вопрос об их семеноводстве, на который можно ответить, что все они в условиях

Нечерноземной зоны хорошо вызревают на семена и могут дать от 10 до 20 ц/га семян. При их высоком коэффициенте размножения эти культуры можно быстро размножить и иметь в хозяйстве свои семена.

Наиболее пригодная для пожнивных посевов горчица белая на семена высевается весной как ранняя яровая культура с нормой посева 20 кг/га и с междурядьями 15 см. при заделке семян в хорошо разделанную почву на глубину 2–3 см с одновременным прикатыванием.

При недостатке семян для ускоренного размножения белую горчицу на семена высевают с нормой посева 10–12 кг/га и с междурядьями 30–45 см [25]. Под предпосевную культивацию вносят по 60–70 кг/га действующего вещества азотных и фосфорно-калийных удобрений.

Семена белой горчицы можно получить в смешанных посевах с горохом, которому горчица в этом случае будет служить «костылями» – поддерживающей культурой. Для этого при посеве гороха его обычную посевную норму семян смешивают с 3 кг/га семян горчицы белой. Семена обеих культур созревают и убираются примерно в одни сроки [22]. При необходимости сразу же после уборки семена горчицы досушиваются до кондиционной влажности 14 % и отделяются от гороха с помощью обычных зерноочистительных машин. Это требование к послеуборочной доработке семян горчицы связано с тем, что ее семена содержат высокий процент жира, и при повышенной влажности во время хранения они быстро теряют всхожесть.

#### **7. Пожнивное зеленое удобрение с соломой – ценное органическое удобрение**

Устойчивое развитие экологически чистого земледелия в рамках современных агроландшафтов тесно связано с проблемой воспроизводства плодородия почв, основой которого является создание бездефицитного баланса гумуса. Гумус является не только носителем питательных веществ, но и источником энергии для полезной почвенной микрофлоры, он существенно влияет на химические, физические и биологические свойства почвы.

В гумусе сосредоточено 98 % запасов почвенного азота, 60 % фосфора, 80 % калия и содержатся все другие минеральные элементы питания растений в сбалансированном состоянии по природной технологии. Наличие гумуса свидетельствует о том, насколько почва живая. Чем больше гумуса, тем лучше водный, воздушный и тепловой режимы почвы, тем насыщеннее почва основными элементами питания, тем активнее идут в ней процессы создания живого из неживого [14, 19, 22].

Создание бездефицитного баланса гумуса в почве является одной из ключевых задач экологически чистого и устойчивого земледелия. Основными приходными статьями баланса гумуса в почве являются органические удобрения и растительные остатки. И те, и другие имеют место быть при использовании как основных, так и промежуточных сидеральных культур.

Основным действующим фактором зеленого удобрения является его органическое вещество, которое в составе зеленой массы, корней поступает в почву и играет важную роль в воспроизводстве ее плодородия.

Как и всякое другое органическое удобрение, зеленое удобрение имеет свои качественные характеристики, которые определяют его удобрительную ценность. Помимо того, что по своему химическому составу зеленое удобрение очень близко к химическому составу удобряемых им сельскохозяйственных культур, и потому после своего разложения в почве способно в полной мере удовлетворить их потребность в питательных веществах, оно является ценным сырьем для образования и пополнения запасов гумуса – основного носителя почвенного плодородия.

Эффективность заделки пожнивного сидерата по своему влиянию на урожай последующих культур – картофеля, ячменя, овса, озимой пшеницы, озимой ржи не уступает внесению 20–30 т/га навоза хорошего качества, особенно если зеленая масса запахивается с соломой озимых и других зерновых культур [22, 25, 26, 36].

Солома с ее широким соотношением азота и углерода является хорошим дополнением к пожнивному зеленому удобрению с очень узким соотношением азота и углерода.

Их сочетание как бы уравнивает соотношение этих двух важных элементов в почве и обеспечивает такой уровень биологической активности и процессов гумификации в почве, который достигается при внесении в почву высококачественного навоза.

Пожнивные сидераты и солома, заменяя недостающие органические удобрения, положительно влияют на плодородие почвы, на баланс органического вещества и питательных веществ, агрофизические и другие показатели плодородия почвы, на фитосанитарное состояние посевов [26, 36, 37, 41].

Высокая эффективность поживного сидерата связана также с улучшением фитосанитарной обстановки в севообороте в результате снижения пораженности растений болезнями, вредителями и уменьшения засоренности посевов зерновых и других сельскохозяйственных культур.

Например, запахка зеленой массы поживного сидерата снижает пораженность картофеля ризоктониозом и паршой в 2–3 раза, ячменя корневыми гнилями – в 1,7–2 раза. Особенно это важно учитывать и использовать в специализированных зерновых, картофельных, льняных и других севооборотах, когда зеленое удобрение позволяет снизить пораженность растений болезнями растений, возбудители которых – почвенные грибы и другие микроорганизмы находятся в почве.

Улучшая условия роста и развития растений, зеленое удобрение повышает устойчивость культурных растений к вредителям и их конкурентную способность в отношении сорных растений.

Известны случаи, когда в годы с массовым распространением шведской мухи на участках, где запахивался сидерат, растения овса повреждались ею на 30–35 % меньше, так как по сидерату растения овса лучше и быстрее росли и развивались, и личинки шведской мухи не успевали повредить точку роста всходов овса. То есть, овес быстрее проходил фазы своего развития и «уходил» от поражения личинками шведской мухи [22].

Наши наблюдения показали, что мощная вегетативная масса загущенных сидеральных растений, высеваемых, как правило, с повышенной нормой посева, подавляет рост и развитие проростков сорных растений, семена которых спровоцированы на прорастание предпосевной обработкой почвы под сидеральные культуры. Установлено, что проростки семян сорняков ингибируются и погибают под влиянием продуктов разложения зеленой массы сидератов [22, 26].

Сидераты могут быть надежными защитниками культурных растений и от вредителей. Выше уже упоминалось об их значении в защите посевов овса от поражения шведской мухой. А в практике голландского земледелия распространен метод биологической защиты сахарной свеклы от свекловичной нематоды с помощью поживных посевов масличной редьки. При бессменном возделывании или при частом возвращении сахарной свеклы на поле в почве накапливаются цисты свекловичной нематоды, которые на границе между пахотным и подпахотным слоями почвы образуют густо населенный ими «цистовый экран». Этот экран является причиной «пальчатости» и значительного снижения урожайности корнеплодов сахарной свеклы. Масличная редька имеет глубоко проникающую стержневую корневую систему, выделения которой убивают живые цисты свекловичной нематоды, разрушают «цистовый экран», обеспечивая тем самым биологическое оздоровление почвы от свекловичной нематоды [22].

Поживная сидерация в сочетании с удобрением соломой является важным фактором биологизации земледелия, который улучшает физические свойства почвы и защищает почву от эрозии, способствуют охране окружающей среды, обеспечивают устойчивое экологическое равновесие и получение экологически чистой продукции [3, 22, 36].

Положительное влияние поживной сидерации на плодородие дерново-подзолистой почвы, на фитосанитарное состояние посевов в конечном итоге благоприятно сказывается на росте, развитии и урожайности сельскохозяйственных культур, на продуктивности севооборота и качестве получаемой продукции.

При промежуточной форме сидерации ее агротехническая эффективность также высока, как и в сидеральном пару, и сопровождается повышением выхода продукции с единицы площади пашни на 17–20 %.

Результаты наших многолетних исследований на среднесуглинистых дерново-подзолистых почвах Подмосковья показали, что если внесение 20 т/га навоза повышает

урожайность картофеля на 48 %, равноценное ему количество минеральных удобрений – на 36 %, то заплата зеленой массы пожнивной горчицы (15–20 т/га) в чистом виде повышает сбор клубней картофеля на 49,8 %, а в сочетании с удобрением соломой (5–6 т/га) – на 58,6 %. При этом повышается товарность клубней и содержание крахмала в них.

На супесчаных дерново-подзолистых почвах Брянской области после пожнивного сидерата урожайность картофеля повышалась на 86 %, после внесения равнозначного количества минеральных удобрений – на 46 %, минеральных удобрений с навозом – на 84 % при одновременном повышении товарности клубней и повышении содержания в них крахмала.

Особенно большое значение пожнивная сидерация как в чистом виде, так и в сочетании с удобрением соломой имеет при зерновой специализации земледелия, которая в последнее время приобретает все большее распространение во многих областях Нечерноземной зоны [36, 46].

В наших стационарных опытах на фоне минеральных удобрений в зерновом севообороте: 1. занятый пар (вика-овес на зеленый корм), 2. озимая пшеница, 3. овес, 4. ячмень, 5. озимая рожь, 6. ячмень при его насыщении зерновыми культурами до 83 % на половине севооборотной площади после озимых культур и ячменя возделывалась и запахивалась пожнивная белая горчица по фактическому урожаю ее зеленой массы (табл. 2) вместе с 5–6 т/га измельченной соломы.

Этот зерновой севооборот сравнивали с плодосменным севооборотом: 1, 2. многолетние травы, 3. озимая пшеница, 4. кукуруза на силос, 5. овес, 6. ячмень с подсевом мн. трав. И в зерновом, и в плодосменном севооборотах минеральные удобрения вносились: под зерновые культуры – в расчете на запланированный урожай 4–5 т/га зерна, под кукурузу – в расчете на 500 ц/га силосной массы, под многолетние травы – на урожай сена 60 ц/га, под вико-овсяную смесь – на 250 ц/га зеленой массы.

Результаты многолетних исследований показали, что исключение из полевого севооборота посевов многолетних трав и доведение удельного веса зерновых культур до 83 % посевной площади севооборота снижало поступление растительных остатков в почву зернового севооборота в среднем за ротацию севооборота с 4,06 т/га в год до 3,47 т/га или на 15 %. При этом соответственно на 9 % уменьшалось поступление углерода в почву (табл. 2).

Однако длительное – в течение 4 севооборотных ротаций (24 года) – использование пожнивного сидерата горчицы белой повышало поступление органического вещества в почву на 32 %, а с ним и углерода – на 62 %. Еще больше – почти вдвое – увеличивалось количество органической массы, поступающей в почву зернового севооборота при пожнивной сидерации совместно с удобрением соломой. При этом прибавка углерода в почве составляла 92 %.

Это увеличение связано не только с тем, что в почву прямо вносилось определенное количество органического вещества в виде зеленой массы горчицы и соломы зерновых культур. Оно определялось также и тем, что зеленое удобрение как в чистом виде, так и в сочетании с удобрением соломой повышало урожайность зерновых культур, а вместе с этим и увеличивало количество органической массы, которое поступало в почву в виде пожнивных и корневых остатков озимых и яровых зерновых культур.

Таблица 2

**Поступление органического вещества в почву в среднем за одну ротацию 6-польного севооборота. Учхоз ТСХА «Михайловское» [36]**

Вид севооборота и % зерновых	Удобрения	Поступление растительных остатков, т/га в год			Поступление углерода, С т/га в год
		пожнивных	корневых	всего	
Плодосмен, 50	НПК	1,27	2,79	4,06	1,59
Зерновой, 83	НПК	1,29	2,18	3,47	1,45
Зерновой, 83	НПК+сидерат	2,14	2,54	4,68	2,35
Зерновой, 83	НПК+сидерат+ солома	4,25	2,76	7,01	2,79

При этом от ротации к ротации в этом процессе прослеживался накопительный эффект от длительного применения пожнивного сидерата как в чистом виде, так и в сочетании с соломой.

Зеленая масса пожнивного сидерата с узким соотношением C:N является своеобразной «биологической растопкой», которая эффективно влияет на биологическую активность почвы и почвенную биоту в зерновых специализированных севооборотах. Установлено, что под ее влиянием микробиологическая активность пахотного слоя почвы повышается в 1,5–2 раза при одновременном изменении видового состава почвенной микрофлоры – в несколько раз повышалось содержание бактерий рода *Clostridium*, и азотофиксирующая способность дерново-подзолистой почвы возрастала в 6–10 раз. Одновременно зеленое удобрение активизировало ферментативную активность почвы: активность уреазы повышалась на 52 %, протеазы – на 45 %, инвертазы – на 10 %, каталазы – на 17 % [14].

Повышение активности почвенной биоты под влиянием поживной сидерации подтверждается и данными учета численности дождевых червей в верхнем слое почвы.

Дождевые черви являются важной составной частью почвенной биоты и своеобразным индикатором состояния плодородия почвы. Поглощая вместе с минеральной частью почвы огромное количество мертвых растительных остатков (пожнивных, корневых, опавших листьев), микробов, грибов, водорослей, нематод и т.д., черви уничтожают и переваривают их. В пищеварительном тракте червей формируются гумусные вещества. В копролитах (каловых массах) червей естественных популяций содержится 11–15 % гумуса на сухое вещество, а в копролитах культивируемых червей содержание гумуса вдвое больше и составляет от 25 до 35 % на сухое вещество.

Установлено, что длительное использование поживной сидерации на фоне минеральных удобрений способствует увеличению количества дождевых червей в пахотном слое дерново-подзолистой почвы в 1,5 раза под посевами ячменя в зерновом севообороте и в 4–5 раз при бессменном посеве ячменя (табл. 3).

Таблица 3

**Количество и биомасса дождевых червей в слое 0–20 см дерново-подзолистой почвы под ячменем. Учхоз ТСХА «Михайловское» [22]**

Севооборот и % зерновых	Удобрение	Весной до посева		После уборки	
		кол-во шт/м <sup>2</sup>	биомасса г/м <sup>2</sup>	кол-во шт/м <sup>2</sup>	биомасса г/м <sup>2</sup>
Плосмен -50 Зерновой -83 Зерновой -83 Зерновой -83	НРК	37	16.5	27	17.1
	НРК	23	12.1	21	14.7
	НРК+сидерат	27	12.7	23	20.2
	НРК+сидерат+ + солома	23	12.3	35	25.7
Бессменные посевы ячменя	Без удобрений	13	7.7	13	7.9
	НРК	28	13.1	29	13.3
	НРК+ сидерат	33	14.2	27	17.8
	НРК+сидерат+ +солома	29	14.3	53	40.5

При пересчете полученных результатов на единицу площади пашни выходит, что на 1 гектар пахотного слоя дерново-подзолистой почвы средней степени окультуренности к концу лета приходится 350–400 тыс. особей дождевых червей общей массой 250–450 кг. Причем максимальных значений эти показатели активности почвенной биоты достигали при использовании поживного зеленого удобрения с соломой.

Положительное влияние поживной сидерации в сочетании с удобрением соломой на весь комплекс показателей плодородия почвы позволяет снять отрицательное воздействие предельного насыщения севооборота зерновыми культурами и получать такие же урожаи

зерновых культур, как и в плодосменном севообороте (табл. 4) с сохранением качество зерна на уровне аналогичных показателей в плодосменном севообороте [36].

Таблица 4

**Урожайность зерновых культур и продуктивность плодосменного и зернового севооборотов, в среднем за 4 ротации севооборотов (24 года).  
Учхоз ТСХА «Михайловское» [36]**

Вид севооборота, % зерновых и удобрение	Урожайность зерна, т/га				Выход зерна т/га
	Ячмень***	Овес***	Озимая пшеница	Озимая рожь	
Плодосмен, 50, NPK	3,28	3,1	3,77	–	1,70
Зерновой, 83, NPK	2,89	2,9	3,50	3,44	2,62
Зерновой, 83, NPK+П.С*	3,12	3,2	3,80	3,66	2,82
Зерновой, 83, NPK +П.С.+С.**	3,18	3,2	3,93	3,91	2,90

\* – пожнивный сидерат (горчица белая), \*\* – пожнивный сидерат + солома,

\*\*\* – под эту культуру в севообороте запахивали зеленое удобрение и солому

При этом проявляется накопительный эффект пожнивной сидерации и удобрения соломой – прибавка урожая зерна озимой пшеницы и озимой ржи, идущих после яровых культур, от этих удобрений была не меньше, а по некоторым ротациям даже больше, чем прибавки урожая ячменя и овса, под которые непосредственно запахивалась горчица и солома.

Рациональное чередование зерновых культур по их видам в специализированном зерновом севообороте в сочетании с многолетним применением пожнивной сидерации, как в чистом виде, так и в сочетании с соломой позволяет увеличить выход зерна с единицы севооборотной площади на 65–70 % при благоприятных экологических условиях.

Исследования, проведенные нами в Тимирязевской сельскохозяйственной академии, показали, что совокупные затраты на зеленое удобрение были на 30–40 % ниже, чем на внесение равноценного количества навоза или других органических удобрений [26, 36].

### Заключение

Результаты многолетних исследований показали, что в условиях постоянно нарастающей потребности в сельскохозяйственной продукции на фоне обострения экологических проблем как в мире, так и в нашей стране техногенные технологии в земледелии требуют дальнейшего совершенствования путем их биологизации с широким привлечением биологически возобновляемых постоянных источников энергии.

Одним из таких источников является зеленое удобрение, которое как органическое удобрение является важным источником органического вещества в почве с заключенной в нем потенциальной солнечной энергией и питательных веществ для сельскохозяйственных культур. Оно является полноценной заменой навоза и других органических удобрений, и в сочетании с соломой, с минеральными и известковыми удобрениями является эффективным средством оптимизации условий жизни сельскохозяйственных растений и повышения их продуктивности.

Зеленое удобрение является экологически чистым органическим удобрением – важным фактором биологизации и экологизации земледелия, приближающим его к природоподобным агротехнологиям. Это определяется, прежде всего, тем, что основные запасы питательных веществ в составе сидеральных растений находятся в виде органического вещества, которое пополняет запасы гумуса в почве, не вымывается из почвы, и потому безопасно для окружающей среды.

Сидерация имеет биogeосистемотехническое значение, так как она определяет оптимальное сочетание биологических и техногенных факторов воспроизводства плодородия почвы в экологически безопасном земледелии.

Использование зеленого удобрения с учетом последних достижений в области агроландшафтоведения, высокоточных агротехнологий, с широкой компьютеризацией и

мониторингом в агробиосистемах имеет большое агроэкологическое, энергосберегающее и экономическое значение. Оно позволяет привлечь в биосферу Земли больше энергии и преодолеть противоречия между развитием современных агроэкосистем и биосферой, которые возникли в последние десятилетия и приобрели планетарное экологическое значение.

#### Примечания:

1. Тимирязев К.А. Избранные сочинения. Т. 2. М.:ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. С. 20.
2. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения в 3 томах. М.: Сельхозгиз, 1965.
3. Лошаков В.Г. Экологические проблемы современных агроландшафтов // Экология и культура: от прошлого к будущему. Ярославль – Борок, НИИ биологии внутренних вод им. Папанина РАН, 2013. С. 13–19.
4. Попов С.Я., Дорожкина Л.А., Калинин В.А. Основы химической защиты растений / Под ред. С.Я.Попова. М.: Арт-ЛионЮ, 2003. 208 с.
5. Баздырев Г.И., Захаренко А.В., Лошаков В.Г., Рассадин А.Я., Сафонов А.Ф., Туликов А.М. Земледелие / Под ред. Г.И. Баздырева. М.: ИНФРА-М, 2013. 608 с.
6. Жученко А.А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы), теория и практика. Т. 1-3. М.: Агрорус, 2008. 814 с. 2009. 1098 с.
7. Чулкина В.А., Торопова Е.Ю., Стрельцов Г.Я. Интегрированная защита растений: фитосанитарные системы и технологии / Под ред. М.С.Соколова и В.А.Чулкиной. М.: Колос, 2009. 670 с.
8. Захаренко В.А. Фитосанитарный мониторинг агроэкосистем и его научно-методическое обеспечение в России. // Сб. Методическое обеспечение мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. М.: Почв. ин-т им. В.В.Докучаева, 2010. С. 124–138.
9. Отчеты Академии Конъюнктуры Промышленных Рынков: [www: akpr.ru](http://www.akpr.ru)
10. Земледелие на рубеже XXI века. М.: МСХА, 2003. 372 с.
11. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2014 году. М.: МЭР РФ, 2015. 224 с.
12. Каштанов А.Н. Земледелие. Избранные труды. М.: Россельхозакадемия, 2008. 685 с.
13. Кочетов И.С. Агроландшафтное земледелие и эрозия почв в Центральном Нечерноземье. М.: Колос, 1999. 222 с.
14. Лошаков В.Г. Севооборот и плодородие почвы / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2012. 512 с.
15. Сычев В.Г., Ефремов Е.Н. Концепция программы агрохимических мероприятий до 2020 года // Инновационные решения регулирования плодородия почв сельскохозяйственных угодий. М.: ВНИИА, 2011. 30 с.
16. Чекмарёв П.А., Лукин С.В. Мониторинг плодородия пахотных почв центрально-черноземных областей России // Агрохимия. 2013. № 4. С. 11-22.
17. Wilhelm R. Neuere Erkenntnisse zur Phosphataufnahme von Pflanzen //Archives of Agronomy and Soil Science February 2006. 52 (1). pp. 1–17.
18. Мерзлая Г.Е., Державин Л.М., Завалин А.А., Лошаков В.Г., Ваулина Г.И., Козлова А.В., Яковлева Т.А. Рекомендации по эффективному использованию соломы и сидератов в земледелии / Под ред. В.Г.Сычева. М.: ВНИИА, 2012. 44 с.
19. Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н. Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья. М.: РАСХН, 2004. 730 с.
20. Володин В.М., Масютенко Н.П., Велюханова О.В. Динамика органического вещества в почве при сельскохозяйственном использовании черноземов. // Мат. н.-пр. конф. «Земледелие в XXI веке. Проблемы и пути их решения». Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2001. С. 206–210.
21. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Мысль, 1967. 232 с.
22. Лошаков В.Г. Зеленое удобрение в земледелии России / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2015. 300 с.
23. Довбан К.И. Зеленое удобрение в современном земледелии. Вопросы теории и практики. Минск: Белорусская наука, 2009. 404 с.
24. Берзин А.М. Зеленое удобрение в Средней Сибири. Красноярск, 2002. 395 с.
25. Лошаков В.Г. Промежуточные культуры в севооборотах Нечерноземной зоны. М.: Россельхозиздат, 1980. 126 с.

26. Лошаков В.Г. Промежуточные культуры как фактор интенсификации земледелия и окультуривания дерново-подзолистых почв. Докт. дисс. М.: ТСХА, 1982. 406 с.
27. Путин В.В. Выступление на заседании генеральной Ассамблеи ООН, сентябрь 2015 г. <http://www.1tv.ru/news/polit/293099>
28. Лошаков В.Г. Пожнивные культуры в условиях Московской области и плодородие дерново-подзолистой почвы. Автореф. канд. дисс. М.: ТСХА, 1965. 16 с.
29. Постников Д.А., Лошаков В.Г., Темирбекова С. Миров М.С., Курило А.А. Сравнительная экологическая оценка традиционных и перспективных сидеральных культур в условиях Московской области // Достижения науки и техники АПК. № 8. 2014. С. 39-43
30. Алексеев Е.К. Зеленое удобрение в нечерноземной полосе. М.: Сельхозгиз, 1959. 278 с.
31. Новиков М.Н., Тужилин В.М., Самохина О.А., Лисятников И.И., Комаров В.И. Биологизация земледелия в Нечерноземной зоне./Под ред. А.И.Еськова. – Владимир: ВНИПТИОУ, 2004. 260 с.
32. Бабичев А.Н., Бакалай Г.Т., Монастырский В.А. Накопление питательных веществ в почве при возделывании картофеля летней посадки после сидеральных культур // Плодородие, 2015. №5. С. 37–39.
33. Kalinitchenko V.P. Biogeosystem technique as a contribution to global food sustainability / Kalinitchenko V.P., Batukaev A.A., Zarmaev A.A., Minkina T.M., Starcev V.F., Dikaev Z.S., Magomadov A.S., Jusupov V.U. // 248th ACS National Meeting & Exposition. 13TH IUPAC International Congress Of Pesticide Chemistry. Crop, Environment, and Public Health Protection. Technologies for a Changing World. Cosponsored by IUPAC and ACS-AGRO. August 10-14, 2014. San Francisco, California, USA. Abstracts. AGRO 143. P. 37.
34. Kalinitchenko V.P. Biogeosystem technique as a method to overcome the Biological and Environmental Hazards of modern Agricultural, Irrigational and Technological Activities / Kalinitchenko V.P., Batukaev A.A., Zinchenko V.E., Zarmaev A.A., Magomadov A.S., Chernenko V.V., Startsev V.F., Bakoev S.U., Dikaev Z.S. // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. Vienna, 2014. DOI: Vol. 16, EGU2014-17015.
35. Valery I. Glazko, Tatiana T. Glazko. Conflicts of Biosphere and Agroecosystems // International Journal of Environmental Problems. 2015. Vol. (1). Is. 1. pp. 4–16. DOI: 10.13187/ijep.2015.1.4
36. Лошаков В.Г. Научно-теоретические основы зерновой специализации севооборотов // Изв. ТСХА, 2006. Вып. 4. С. 3–22.
37. Ряховская Н.И., Шалагина Н.М., Гайнатулина В.В., Аргунеева Н.Ю. Влияние сидерата и органоминеральных удобрений на плодородие почвы и урожайность культур севооборота в условиях Камчатского края // Плодородие. 2015. №5. С. 48–50.
38. Титова В.И., Дабахова Е.В., Титова Е.О., Макаров Д.Ю., Цыгуткин А.С. Эффективность использования микробиологического препарата под белый люпин, выращиваемый на не удобренном фоне // Плодородие. 2015. №5. С. 55–57.
39. Loschakov V.G. Einfluss der langj?hrigen Stoppelfruchtgr?n- und Strohd?ngung auf die Fruchtbarkeit von Rasenpodsolb?den und den Kornerertrag. Archiv f?r Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde. 2002. Vol. 48. N. 6. pp. 593–602.
40. Постников П.А. Агроэкологический мониторинг при применении зеленых удобрений // Плодородие. 2014. №1. С. 42–43.
41. Глушков В.В. Пожнивные сидеральные культуры и продуктивность ярового ячменя // Плодородие. 2013. №4. С. 39–40.
42. Огородников Л.П., Постников П.А. Оценка севооборотов в полевых и лизимитрических исследованиях. // Плодородие. 2015. №5. С. 39–41.
43. Шпаар Д., Лошаков В.Г., Постников А.Н. и др. Возобновляемое растительное сырье / Под ред. Д. Шпаара. С-Петербург – Пушкин, 2006. Кн. 1. 416 с. Кн. 2. 382 с.
44. Шпаар Д., Лошаков В.Г., Пыльнев В. В. и др. Рапс и сурепица. Выращивание, уборка, использование / Под ред. Шпаара. М.: Изд. ООО «DLV АГРОДЕЛО», 2007. 320 с.
45. Яговенко Л.Л., Яговенко Г.Л. Гумусное состояние почвы в севооборотах с люпином // Плодородие. 2007. №5. С. 17–18.
46. Сычев В.Г., Лошаков В.Г., Мерзлая Г.Е. Романенков В.А. Воспроизводство плодородия почвы при зерновой специализации земледелия в Центральном районе Нечерноземной зоны (научно-практические рекомендации). М.: ВНИИА, 2012. 48 с.



**References:**

1. Timiryazev K.A. Fav. cit., vols.1-4. M.: OGIZ-Selkhozgiz, 1948. P. 20.
2. Pryanichnikov D.N. Selected works in 3 volumes. M.: Selkhozgiz, 1965.
3. Ecological problems of modern agricultural landscapes // Ecology and Culture: from the past to the future. Yaroslavl-Borok, Institute of Biology of Inland Waters named after I.D. Papanin RAS, 2013. pp. 13–19.
4. Popov S.Ja., Dorogkina L.A., Kalinin V.A. The basics ja chemical plant protection /Ed. S.Ja. Popov M.: Art-LionJu, 2003. 208 p.
5. Bazdyrev G.I., Loshakov V.G., Rassadin A.Y., Safonov A.F., Tulikov A.M. Agriculture / Ed. G.I. Bazdyrev. M.: INFRA-M, 2013. 608 p.
6. Zhuchenko A.A. Adaptive crop (ecological and genetic basis), theory and practice. T. 1-3. M.: Agrorus. 2008. 814 p. 2009. 1098 p.
7. Chulkina V.A., Toropova E.Ju., Streltsov G.JA. The integrated plant protection: systems and technologies./Ed. M.S. Sokolov and V.A. Chulkina. M.: Kolos, 2009. 670 p.
8. Zacharenko V.A. Phitosanitari monitoring of agro-ecosystems and its scientific and methodological support in Russia // Methodological support for monitoring of agricultural. M.: Dokuchaev Soil Inst. 2010. pp. 124–138.
9. Report academy situation of industrial markets www: akpr.ru
10. Agriculture on rubezhe XXI century. M.: MSHA, 2003. 372 p.
11. State (national) report on the status and use of land in the Russian Federation in 2014. M.: MERRF, 2015. 224 p.
12. Kashtanov A.N. Agriculture. Selected works. M.: Rosselhozacademy. 2008. 685 p.
13. Kochetov I.S. Agrolandshafthe agriculture and soil erosion in the Central Non-Black Earth. M.: Koloc, 1999. 222 p.
14. Loshakov V.G. Crop rotation and soil fertility/Ed. V.G. Sychev. M.: VNIIA, 2012. 512 p.
15. Sychev V.G., Efremov E.N. Program concept agrochemical activeties until 2020 // Innovative solutions to control soil fertility of agricultural lands. M.: VNIIA, 2011. 30 p.
16. Chekmarjov P.A., Lukin S.V. Monitoring of soil fertility of arable central Black-Earth of Russia // Agrochemie, 2013. № 4. pp. 11–22.
17. Wilhelm R. Neuere Erkenntnisse zur Phosphataufnahme von Pflanzen // Archives of Agronomy and Soil Science, February 2006. 52 (1). pp. 1–17.
18. Mjorzlaja G.E., Derzhavin L.M., Zavalin A.A., Loshakov V.G., Vaulina G.I., Kozlova A.V., Jakovleva T.A. Recommendations jn the efficient use of straw and green manure in agriculture./ Ed. VG Sychev. M.: VNIIA 2012. 44 p.
19. Lykov AM., Eskov AI, Novikov MN. The organic of arable soils Nechernozemie.M.: RASHN, 2004. 730 p.
20. Volodin V.M., Masjutenko N.P., Veljuhanova O.V. The dynamics of organic matter in the soil under agricultural use topsoil. // Proceedings of the conference “Agriculture in the 21 st century. Problems and sjunions”. Kursk: ВНИИЗиЗПЭ, 2001. pp. 206–210.
21. Vernadskij V.I. Biosphere M.: Misl, 1967. 232 p.
22. Loshakov V.G. Green manure in agriculture in Russia /Ed. V.G. Sychev. M.: VNIIAA, 2015. 300 p.
23. Dovban K.I. Green manure in modern agriculture. Theory and Practice. Minsk: Belarusian Scince, 2009. 404 p.
24. Berzin A.M. Green manure in Central Sibirie. Krasnojarsk, 2002. 395 p
25. Loshakov V.G. Intermediate crops in rotacion Njnchernozem region. M.: Rosselchosizdat, 1980. 126 p.
26. Loshakov V.G. Intermediate culture as a factor in the intensification of agriculture and cultivation of sod-podzolic soils. Dokt. habil diss. M.: TSHA, 1982. 406 p.
27. Putin V.V. Speech at the UN General Assembly, September 2015. <http://www.1tv.ru/news/polit/293099>.
28. Loshakov V.G. Stubble culture in the Moscow region and the fertility of sod-podzolic soil. Avtoref. diss.r. sh. n. M.: TSHA, 1965. 16 p.
29. Postnikov D.A. Comparative evaluation of traditional agroecological and promising green manure crops in the conditions of the Moscow oblast / Postnikov DA, Temirbekova S.K., Loshakov

V.G., Norov M.S., Kurilo A.A. // Successes of scientific and technological agriculture. 2014. №8. pp. 39–43.

30. Alekseev E.K. Green manure in Nonchernozem zone. M.: Selkhozgiz, 1959. 278 p.

31. Novikov M.N., Tuzhilin V.M., Samohina O.A., Lisjatnikov P.I., Komarov V.I. Biologization of agriculture in the Nonchernozem zone. Vladimir: VNIPTIOU, 2004. 260 p.

32. Babichev A.N., Bakalaj G.T., Monastirskij V.A. The accumulation of nutrients in the soil in the cultivation of potatoes year after planting green manure crops. // Plodorodie, 2015. №5. pp. 37–39.

33. Kalinitchenko V.P. Biogeosystem technique as a contribution to global food sustainability / Kalinitchenko V.P., Batukaev A.A., Zarmaev A.A., Minkina T.M., Starcev V.F., Dikaev Z.S., Magomadov A.S., Jusupov V.U. // 248th ACS National Meeting & Exposition. 13TH IUPAC International Congress Of Pesticide Chemistry. Crop, Environment, and Public Health Protection. Technologies for a Changing World. Cosponsored by IUPAC and ACS-AGRO. August 10-14, 2014. San Francisco, California, USA. Abstracts. AGRO 143. P 37.

34. Kalinitchenko V.P. Biogeosystem technique as a method to overcome the Biological and Environmental Hazards of modern Agricultural, Irrigational and Technological Activities / Kalinitchenko V.P., Batukaev A.A., Zinchenko V.E., Zarmaev A.A., Magomadov A.S., Chernenko V.V., Startsev V.F., Bakoev S.U., Dikaev Z.S. // Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly Vienna, 2014. DOI: Vol. 16, EGU2014-17015.

35. Valery I. Glazko, Tatiana T. Glazko. Conflicts of Biosphere and Agroecosystems // International Journal of Environmental Problems. 2015. Vol. (1). Is. 1. pp. 4–16. DOI: 10.13187/ijep.2015.1.4

36. Loshakov V.G. Scientific-theoretical foundations of the grain crop rotations specialization // Math. TAA. 2006. Vol. 4. pp. 3–22.

37. Rjachovskaja N.I., Schalagina N.M., Gajnatulina V.V., Arguneeva N.Ju. Effect of green manure and organic fertilizers on soil fertility and crop yields crop rotation in the conditions of the Kamchatka region. // Plodorodie. 2015. №5. pp. 48–50.

38. Titova V.I., Dabachova E.V., Titova E.O., Makarov D.Ju., Zigutkin A.S. The efficiency of microbial drug under white lupins grown on unfertilized background. // Plodorodie. 2015. №5. pp. 55–57.

39. Loschakov V.G. Einfluss der langjährigen Stoppelfruchtgrün- und Strohdüngung auf die Fruchtbarkeit von Rasenpodsolböden und den Kornerertrag. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 2002. Vol. 48. N.6. pp. 593–602.

40. Postnikov P.A. Agroecological monitoring the application of green fertilizers. // Plodorodie. 2014. № 1. pp. 42–43.

41. Glushkov V.V. Green manure crops and crop productivity of spring barley. // Plodorodie. 2013. №4. pp. 39–40.

42. Ogorodnikov L.P., Postnikov P.A. Evaluation in field crop rotations and lysimeter studies. // Plodorodie. 2015. №5. pp. 39–41.

43. Shpaar D., Loshakov V.G., Postnikov P.A. et al. Renewable vegetable raw materials. / Ed. D. Shpaar – S-Peterburg – Pushkin, 2006. B. 1. 416 p. B.2. 382 p.

44. Shpaar D., Loshakov V.G., Pilnev V.V. et al. Raps and rape. Growing, harvesting, use. / Ed. D. Shpaar. M.: OOO «DLV AGRODELO», 2007. 320 p.

45. Jagovenko L.L., Jagovenko G.L. Humus condition of the soil in crop rotation with lupine. // Plodorodie. 2007. №5. pp. 17–18.

46. Sychev V.G., Loshakov V.G., Mjorzlaja G.E., Romanenkov V.A. The reproduction of soil fertility in the specialization of grain farming in the central region of non-chernozem zone (scientific and practical recommendations). M.: VNIIA, 2012. 48 p.

## **Сидерация как фактор биологизации земледелия и природоподобных агротехнологий**

Владимир Григорьевич Лошаков

ВНИИ агрохимии им. Д.Н.Прянишникова, Российская Федерация  
Доктор с.-х. наук, профессор, главный научный сотрудник  
E-mail:LVG36@yandex.ru

**Аннотация.** В статье дается анализ развития мирового и российского земледелия, раскрыты проблемы экологии агроландшафтов, роль зеленых растений в развитии биосферы, формировании почвы и основного показателя ее плодородия – гумуса. Показана теневая сторона техногенных технологий, которые стали причиной мировых экологических проблем. Теоретически и экспериментально обоснована необходимость дальнейшего развития земледелия на основе биологизированных природоподобных агротехнологий, одной из которых является сидерация – зеленое удобрение.

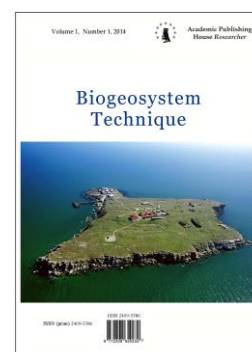
На основе собственных многолетних оригинальных исследований, а также результатов исследований многих научных учреждений в нашей стране и за рубежом, изложена перспективная технология использования зеленого удобрения применительно к конкретным почвенно-климатическим условиям. Показана высокая агротехническая, агроэкологическая, энергосберегающая и экономическая эффективность сидерации в занятых парах и при пожнивных посевах сидератов в сочетании с соломой на фоне минеральных удобрений. Оптимальный синтез биологических природоподобных и техногенных средств воспроизводства плодородия почвы обеспечивает повышение урожайности сельскохозяйственных культур и получения экологически чистой сельскохозяйственной продукции. Это определяет биогеосистемотехническое значение сидерации в экологически безопасном земледелии, дает возможность преодолеть противоречие между развитием современных агроэкосистем и биосферой, привлечь через земледелие в биосферу Земли дополнительную энергию, создать дополнительное биологическое вещество.

**Ключевые слова:** биосфера, сидерация, гумус, занятый пар, промежуточные культуры, пожнивные культуры, гумус, экологически значимая агротехника.

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*

Published in the Russian Federation  
Biogeosystem Technique  
Has been issued since 2014.  
ISSN: 2409-3386  
E-ISSN: 2413-7316  
Vol. 6, Is. 4, pp. 396-400, 2015

DOI: 10.13187/bgt.2015.6.396  
[www.ejournal19.com](http://www.ejournal19.com)



## Soil Saturated Hydraulic Conductivity Assessment by Direct and Pedotransfer Functions Methods

<sup>1</sup> Evgeny V. Shein

<sup>2</sup> Ahmed Y. Mady

<sup>3</sup> El Hassna A. Mohamed

<sup>1-2</sup> Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Soil Physics and Reclamation Department. Leninskie Gory. 119991 Moscow RUSSIA;

<sup>2-3</sup> Ain Shams University, Faculty of Agriculture, Soil science Department, Hadayek Shoubra 11241, Cairo, Egypt

<sup>1</sup> Head of Soil Physics and Reclamation Department, Soil Science Faculty, Moscow State University. 119991, Moscow

E-mail: [evgeny.shein@gmail.com](mailto:evgeny.shein@gmail.com)

<sup>2</sup> PhD. Student of Soil Physics and Reclamation Department

Lomonosov Moscow State University and Assistant Lecturer in Soil Science department, Faculty of Agriculture, Ain Shams University, Hadayek Shoubra 11241, Cairo, Egypt

<sup>3</sup> Professor of Soil Physics, Soil Science Department Ain Shams University, Faculty of Agriculture, Ain Shams University, Hadayek Shoubra 11241, Cairo, Egypt

### Abstract

The aim of the work is to study the efficiency of PedoTransfer Functions (PTFs) to estimate saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) from indirect methods (PTFs), by comparing the experimental saturated hydraulic conductivity ( $K_{s0}$ ) that was determined from direct method with  $K_s$  were estimated from indirect methods (PTFs). Different indirect methods (PTFs) are used to estimate  $K_s$ : Wösten (1997) ( $K_{s1}$ ), Wösten et al (1999) ( $K_{s2}$ ), Cosby et al (1984) ( $K_{s3}$ ), Saxton et al (1986) ( $K_{s4}$ ), Vereecken et al (1990) ( $K_{s5}$ ) and Ferrer-Julia et al (2004) ( $K_{s6}$ ). The results observed that (PTFs) are depending on: bulk density, organic matter, Clay and Sand contents. The efficiency of (PTFs) is estimated on the correlation between these parameters and saturated hydraulic conductivity. (PTFs) depend on clay and sand percents which forming macro and micro pores while don't depended on silt content. There were positive strong correlations between  $K_{s0}$  and ( $K_{s1}$ ), ( $K_{s4}$ ), ( $K_{s3}$ ), ( $K_{s6}$ ) and ( $K_{s5}$ ), correlation ( $r^2$ ) were (0.846, 0.798, 0.785, 0.719 and 0.667) respectively.

**Keywords:** soil, saturated hydraulic conductivity, pedotransfer functions (PTFs), soils of Gaza Governorate.

### Introduction

The concept of (pedotransfer function) (PTFs, pedotransfer functions) in today's broad enough understanding was introduced by J. Bouma (1989) to describe mathematical functional dependencies, allows to convert information about the main traditional soil properties (predictors) in the information of the soil water, matter and energy soil characteristics Usually this term is referred functions to restore the curve of water retention on such predictors as both particle size

distribution, mineralogical composition, soil density, organic matter content, and others. At present, this term is not only used in Hydrophysics soil, but also in a wider sense, in almost all areas of soil science to refer to any mathematical relationships between soil properties. Currently, scientific interest and practical need for PTFs are growing rapidly, primarily because of the calculated predictive mathematical model of hydro-dependencies require that it is difficult to determine experimentally and costly, and restore on the fundamental properties of traditionally defined -significantly easier and cheaper. Currently, there was also the target of a PTFs monograph on their accuracy, their possible use for all sorts of calculations, in particular, collective monograph published in 2004 by the publishing house "Elsevier", edited by Ya. Pachepsky and W.J. Rawls "Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology" (Pachepsky Ya., Rawls W.J. Preface: Status of pedotransfer functions. In: Development of (pedotransfer functions) in soil hydrology. Elsevier, 2004. Pp.512.). However, apart from the equilibrium water retention curves for hydrological calculations required and the conductivity function, which is based on the use of such an important hydrological characteristics as the saturated hydraulic conductivity of the soil. It is also possible to define only experimentally in the field, it is very costly and time consuming. It is therefore natural to expect attempts to use PTFs for the calculation of this important hydrological characteristic.

The aim of the work is to study the efficiency of PedoTransfer Functions (PTFs) to estimate saturated hydraulic conductivity from indirect methods (PTFs), by comparing the saturated hydraulic conductivity  $K_{s-0}$  that was determined from direct method with saturated hydraulic conductivity were estimated from indirect methods (PTFs). Saturated hydraulic conductivity is an important soil physical property, especially for modeling water flow and solute transport in soil, irrigation and drainage design, groundwater modeling and other agricultural and engineering, and environmental processes. Many direct methods have been developed for its measurement in the field and laboratory (Libardi et al., 1980; Klute and Dirksen, 1986). Direct measurement techniques of the hydraulic conductivity are costly and time consuming, with large spatial variability (Christiaens and Feyen, 2002; Islam et al., 2006). Alternatively, indirect methods may be used to estimate hydraulic conductivity from easy-to-measure soil properties. Many indirect methods have been used including prediction of hydraulic conductivity from more easily measured soil properties, such as texture classes, the geometric mean particle size, organic carbon content, bulk density and effective porosity (Wösten and van Genuchten, 1988) and inverse modeling techniques (Rasoulzadeh, 2010; Rasoulzadeh and Yaghoubi, 2011). In recent years, pedotransfer functions (PTFs) were widely used to estimate the difficult-to-measure soil properties such as hydraulic conductivity from easy-to-measure soil properties.

### Material and Methods

The soil samples were collected from two locations. The first one is El- dokki green house of Climate Agriculture Research, Minister of Agriculture, Gaza Governorate. Three soil profiles were dug, then soil samples were collected according to the difference in morphological features Coordinates Latitude  $30^{\circ} 2' 46''$  N Longitude  $31^{\circ} 12' 19''$  E , Coordinates Latitude  $30^{\circ} 2' 47''$  N Longitude  $31^{\circ} 12' 18''$  E and Latitude  $30^{\circ} 2' 47''$  N Longitude  $30^{\circ} 12' 19''$  E respectively. The second location is El harm green house, Minister of Agriculture, Gaza Governorate. Four soil profiles were dug in sites where the soil was under conventional tillage every year before the cultivation. Coordinates Latitude  $29^{\circ} 59' 71''$  N Longitude  $31^{\circ} 10' 06''$  E , Latitude  $29^{\circ} 59' 72''$  N Longitude  $31^{\circ} 10' 05''$  E, Latitude  $25^{\circ} 59' 7''$  N Longitude  $31^{\circ} 10' 08''$  E and Latitude  $29^{\circ} 59' 72''$  N Longitude  $31^{\circ} 10' 07''$  E respectively. Soil profiles were dug down to different depths, selected soil samples were taken from different layers in each profiles. All soil profiles were carefully examined in the field and morphologically described according to the procedure outlined by the Soil Survey Staff (1993) and to the FAO Guide Lines for soil description (2006). Disturbed and undisturbed soil samples were collected from profile layers according to their difference in morphological features. Undisturbed soil samples were taken by metallic cylinders of 5cm high and 5cm inner diameter. Particle size distribution was determined according to the International pipette method by Gee and Bauder (1986). Soil bulk density was determined in the studied soil samples by core method Klute and Dirksen (1986). Organic matter was determined by Walkely-Black rapid titration method (Nelson, Sommers, 1982). Saturated hydraulic conductivity was determined direct method using constant head method technique according to Klute and Dirksen (1986), and pedotransfer functions for

estimating saturated hydraulic conductivity (PTFs) were calculated: PTFs which used to estimate saturated hydraulic conductivity (Ks) were developed using texture classes, the geometric mean particle size, organic carbon content, bulk density and effective porosity as predictor variables. Many PTFs were presented to predict Ks. Here the following PTFs for Ks are considered. All PTFs give Ks in [m/s]. We estimate KS using six equations to estimate efficiency of each one. Theses equations Wösten (1997) presented a function for determining Ks, and then Wösten et al. (1999) represented another function as follows:

$$Ks = 1.15741 \cdot 10^{-7} \exp(x)$$

Where (x) depend on soil texture, percent of clay, organic matter and bulk density. The Cosby's pedotransfer function (Cosby et al., 1984) was derived based on Sand and Clay contents then Saxton et al. (1986) suggested a pedotransfer function to estimate Ks as follows

$$Ks = 2.778 \cdot 10^{-7} \exp(x)$$

Where x depend on are the percentage of clay and sand, respectively, and saturated water content. Vereecken et al (1990) provided a equation for estimating Ks as follows:

$$Ks = 1.1574 \cdot 10^{-7} \exp (20.62-0.96 \ln(\text{clay})-0.66 \ln (\text{sand}) -0.46 \ln(\text{O.M})-0.00843(\text{B.D}) )$$

Ferrer-Julia et al. (2004) derived a relationship between Ks and sand content of soil. Statistics analysis using program SPSS

Table 1

**Correlations between Experimental Field saturated Hydraulic conductivity (Ks0) and estimated by different Pedotransfer functions (PTFs) presented in the table**

Correlations (25 repetitions)								
		Ks0	Ks1	Ks2	Ks3	Ks4	Ks5	Ks6
Ks0	Pearson Correlation	1	,846**	,484*	,785**	,798**	,667**	,719**
	Means Significance		,000	,014	,000	,000	,000	,000
Ks1	Pearson Correlation	,846**	1	,674**	,580**	,748**	,390	,550**
	Sig. (2-tailed)	,000		,000	,002	,000	,054	,004
Ks2	Pearson Correlation	,484*	,674**	1	,436*	,317	-,117	,516**
	Sig. (2-tailed)	,014	,000		,029	,122	,576	,008
Ks3	Pearson Correlation	,785**	,580**	,436*	1	,598**	,573**	,979**
	Sig. (2-tailed)	,000	,002	,029		,002	,003	,000
Ks4	Pearson Correlation	,798**	,748**	,317	,598**	1	,616**	,541**
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,122	,002		,001	,005
Ks5	Pearson Correlation	,667**	,390	-,117	,573**	,616**	1	,424*
	Sig. (2-tailed)	,000	,054	,576	,003	,001		,035
Ks6	Pearson Correlation	,719**	,550**	,516**	,979**	,541**	,424*	1
	Sig. (2-tailed)	,000	,004	,008	,000	,005	,035	
*and**-Correlation is significant at the 0.05 and 0.01 level;								
*** - Means Significance* (2-tailed)								

## Results and discussion

Table 1 shows saturated Hydraulic conductivity estimated by different Pedotransfer functions (PTFs) and experimental ones. The best were the ones that had the highest correlation coefficients with experimental values. The results observed (table 1) that the best (PTFs) can be used to estimate saturated hydraulic conductivity were the next PTFs: (Ks1) (Wösten 1997), (Ks4) Saxton et al (1986), (Ks3) Cosby's pedotransfer function, ( Ks6) Ferrer-Julia et al.( 2004) and (Ks5) Vereecken et al (1990) respectively, where there were high positive strong correlations with K<sub>so</sub> and (Ks1) ,(Ks4),(Ks3),(Ks6) and (Ks5), correlation were(0.846-0.798-0.785-0.719 and 0.667 ) respectively. It was observed that the relationships between K<sub>so</sub> and the parameters (predictors) that used in (PTFs) were: Bulk Density (-0.602), Organic Matter percent (0.794), Clay (-0.761), Silt (0.365) and Sand percent (0.627), respectively. So such (PTFs), – (Wösten 1997), Saxton et al (1986), Cosby's pedotransfer function, Ferrer-Julia et al (2004) and Vereecken et al (1990) that depend on these parameters, were more significant with K<sub>so</sub> (table 1). While we have a low correlation between K<sub>so</sub> and (Ks2) (correlation was 0.484); we propose that in this case PTFs use the silt percent as predictor, but the correlation between K<sub>so</sub> and silt percent correlation is rather low (0.365). Soil Saturated Hydraulic conductivity first of all depends on organic matter (%), clay and sand content (%), and soil density (g/cm<sup>3</sup>). PTFs that depend on these parameters were more significant and high efficiency.

## Conclusion

The results observed (table 1) that the best PTFs can be used to estimate saturated hydraulic conductivity were the next: (Ks1) (Wösten 1997), (Ks4) Saxton et al (1986), (Ks3) Cosby's pedotransfer function, ( Ks6) Ferrer-Julia et al.( 2004) and (Ks5) Vereecken et al (1990) respectively, where there were high positive strong correlations with direct field experimental values (K<sub>so</sub>). Saturated hydraulic conductivity researches in soils of different particle size distribution and density, with a large range of organic matter will clarify listed correlation relations and the use of RTF ("Development of pedotransfer functions ...". 2004; Kalinitchenko et al, 2010, 2012, 2014 et al).

## References:

1. Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*. 1989. 9: 177–213.
2. Christiaens K., and J. Feyen. Analysis of uncertainties associated with different methods to determine soil hydraulic properties and their propagation in the distributed hydrological MIKE SHE model. *Journal of Hydrology*. 2001. V. 246: 63–81.
3. Cosby B.J., G.M. Hornberger, R.B. Clapp, and T.R. Ginn. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*. 1984. V. 20 (6): 682–690.
4. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Ed: Pachepsky Ya., Rawls W.J. Elsevier, 2004. pp. 512.
5. Ferrer-Julia M., T. Estrela Monreal, A. Sánchez del Corral Jiménez and E. García Meléndez. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*. 2004. V. 123: 275–277.
6. Gee, G.W. and J.W. Bauder Particle size analysis. *Method of soil analysis, Part I. Agronomy Monograph (2nd Edition)*. 1986. pp. 383–411.
7. Islam N., W. W. Wallender, J. P. Mitchell, S. Wicks, and R. E. Howitt. Performance evaluation of methods for the estimation of soil hydraulic parameters and their suitability in a hydrologic model. *Geoderma*. 2006. V. 134: 135–151.
8. Klute A., C. Dirksen Hydraulic conductivity of saturated soils. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. ASA & SSSA, Madison, Wisconsin, USA, 1986. pp. 694–700.
9. Kalinichenko V.P. Patent RU № 2386243 C1. Method of intra-soil pulse discrete irrigation. IPC A01G 25/06 (2006.01) A01S 23/02 (2006.01). Patentee Kalinichenko V.P. Application number 2009102490 on 16.01.09 . Published on 20.04.2010. Bull. Number 11.
10. Kalinichenko VP, Minkina TM, Bezuglova OA, Ilina LP Skovpen AN, Chernenko VV, Radevich EV, Boldyrev AA Paradigm of irrigation / Proceedings of the VI Congress of Soil Science Society of them. VV Dokuchaev. Russian international conference involving "Soils Russia: current

state and prospects of learning and use (Petrozavodsk, Moscow, 13–18 August 2012). Petrozavodsk: Karelian Research Centre, 2012. Vol. 2. pp. 157–159.

11. Kalinichenko V. P., Sharshak V. K., Mironchenko S. F., Chernenko, V. V., Ladan, E.P., Genev, E. D., Illarionov V. V., Udalov A. V., Udalov V. V., Kippel E. V. Changes in the properties of soils in a solonetz soil complex thirty years after reclamation // Eurasian Soil Science. 2014. Vol. 47. Issue. 4. pp. 319–333. DOI: 10.1134/S1064229314040024

12. Libardi P.L., K. Reichardt, D.R. Nielsen, and J.W. Biggar. 1980. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Journal 44: 3–7.

13. Nelson D.W. and Sommers L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L.; Miller, R.H. and Keeney, D.R., (eds). Methods of soil analysis. 1982. 2nd Ed. Part 2. pp. 539–579. Agronomy Monogr. 9. ASA and SSSA, Madiscon, Wisconsin, USA.

14. Rasoulzadeh A. Evaluation of parameters estimation using inverse method in unsaturated porous media, 10th International Agricultural Engineering Conference, Bangkok, Thailand, December 7–10 2010.

15. Rasoulzadeh A., and A. Yaghoubi Study of cattle manure effect on soil hydraulic properties using inverse method. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology (ICEST), Singapore, February 26–28 2011.

16. Saxton K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger, and R.I. Papendick. Estimating generalized soil water characteristics from texture. Soil Science Society of America Journal. 1986. V. 50: 1301–1036.

17. van Genuchten, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Science Society of America Journal. 1980. V. 44: 892–898.

18. Vereecken H., J. Maes, and J. Feyen Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. Soil Science. 1990. V. 149: 1–12.

19. Wösten, J.H.M., and M.T. van Genuchten. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Journal. 1988. V. 52: 1762–1770.

20. Wösten J.H.M. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: Gegerich, E.G.

21. Carter, M.R. (Eds.) Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soils Science. 1997. Vol. 25. Elsevier, Amsterdam P. 221–245.

22. Wösten J.H.M., A. Lilly, A. Nemes, and C. Le Bas. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma. 1999. V. 90: 169–185.