Міністэрства адукацыі Рэспублікі Беларусь
Установа адукацыі «Брэсцкі дзяржаўны ўніверсітэт імя А. С. Пушкіна»

Вучоныя запіскі

Брэсцкага ўніверсітэта

Зборнік навуковых прац

Выпуск 15

Частка 2
Прыродазнаўчыя навукі

Брэст • 2019

Заснаваны ў 2005 годзе

Галоўны рэдактар
А. М. Сендзер
Намеснікі галоўнага рэдактара:
С. М. Севярын *(частка 1. Гуманітарныя і грамадскія навукі)*
А. Я. Будзько *(частка 2. Прыродазнаўчыя навукі)*
Рэдакцыйны савет:
В. Е. Гайдук, К. К. Красоўскі, Л. Г. Лысюк, Б. М. Ляпешка, З. П. Мельнікава
Міжнародны савет:
А. А. Афонін (Расія), Ф. Я. Васілюк (Расія), В. А. Главан (Молдова),
Марцін Грабэ (Германія), М. М. Громаў (Расія), В. В. Дзікусар (Расія), Андраш Золтан (Венгрыя),
Антон Мірановіч (Польшча), В. А. Несцяроўскі (Украіна), Ежы Нікітаровіч (Польшча),
Станіслаў Рудальф (Польшча), Б. В. Саліхаў (Расія), В. Р. Самойленка (Украіна),
Фелікс Чыжэўскі (Польшча), Антоні Юўка (Польшча), Эдвард Ярмох (Польшча)
Рэдакцыйная калегія:
Г. І. Займіст *(адказны рэдактар часткі 1. Гуманітарныя і грамадскія навукі),*
Н. С. Ступень *(адказны рэдактар часткі 2. Прыродазнаўчыя навукі),*
У. В. Амелькін, С. В. Арцёменка, М. А. Багдасараў, В. Ф. Байнёў, В. У. Будкевіч,
А. М. Вабішчэвіч, І. Я. Валітава, В. М. Ватыль, П. А. Вадап'янаў, А. М. Вітчанка, А. А. Волчак,
Т. А. Гарупа, А. М. Грыгаровіч, А. А. Гужалоўскі, А. Л. Гулевіч, Т. І. Доўнар, М. П. Жыгар,
В. І. Іўчанкаў, М. С. Кавалевіч,Т. А. Кавальчук, Ч. С. Кірвель, У. Л. Клюня, П. П. Крусь,
У. У. Лосеў, А. А. Лукашанец, М. І. Ляўчук, В. С. Манахаў, І. П. Мартынаў, А. А. Махнач,
А. В. Мацвееў, У. А. Плецюхоў, С. В. Рашэтнікаў, Д. Г. Ротман, В. Ф. Русецкі,
А. А. Савіч, У. С. Секяржыцкі, М. Н. Сендзер, У. А. Сенькавец, Я. У. Скакун, А. С. Сляповіч,
В. А. Сцепановіч, В. І. Сянкевіч, Л. Р. Цітарэнка, М. М. Труш, І. А. Швед,
Я. К. Яловічава, Я. С. Яскевіч

Адрас рэдакцыі:
224665, г. Брэст, бульвар Касманаўтаў, 21
тэл.: 21-72-07
e-mail: *vesnik@brsu.brest.by*

ISBN 978-985-22-0076-9 (ч. 2)
ISBN 978-985-22-0074-5

© УА «БрДУ імя А. С. Пушкіна», 2019

Вучоныя запіскі

Брэсцкага ўніверсітэта

ЗБОРНІК НАВУКОВЫХ ПРАЦ

2019 • Вып. 15 • Ч. 2

ЗМЕСТ

МАТЭМАТЫКА

Грицук Д. В. Инварианты конечных частично разрешимых групп с ограниченными кофакторами 7

Матысик О. В. Неявный итерационный процесс приближенного решения операторных уравнений первого рода 15

ФІЗІКА

Секержицкий В. С. К вопросу об уравнениях состояния крайне вырожденных идеальных ферми-газов в магнитном поле 26

ХІМІЯ

Bohoslavets M. M., Chelyadyn L. I., Medvid M. I. Physical, Electrical and Chemical Aspect of Technology of Infiltrates Treatment of Domestic Waste Landfills 34

Ступень Н. С. Развитие периодической системы химических элементов 41

БІЯЛОГІЯ

Абрамова И. В., Гайдук В. Е. Синантропизация и урбанизация сизого голубя (*Columba livia*, Columbiformes) в юго-западной Беларуси 54

Бойко В. И., Волосюк С. Н. Анатомическая характеристика коры однолетнего стебля некоторых кустарниковых покрытосеменных растений 60

Ленивко С. М. Генно-инженерный подход в создании новых форм растений, устойчивых к абиотическим факторам 67

Матусевич Н. М., Жигар М. П. Заложение феллогена и формирование перидермы у некоторых розоцветных 73

Саваневский Н. К., Хомич Г. Е. Анализ медленноволновых колебаний функционирования как один из методов исследования сердечно-сосудистой системы 81

Шкуратова Н. В. Состав инвазионных растений урбанизированных территорий на примере рекреационной зоны Парка воинов-интернационалистов г. Бреста 89

НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ

Гречаник Н. Ф. Петрографический состав обломочного материала абляционной морены на территории Высоковской равнины 98

Корженевич С. В. Современное состояние и прогноз развития демографической ситуации в Белорусском Полесье 110

Шевченко А. Л., Осадчий В. И., Чарный Д. В. Изменения режима, баланса и ресурсов подземных вод Полесья и лесостепи Украины под влиянием глобального потепления..... 117

Богдасаров М. Памяти ученого 129

Ministry of education of Republic of Belarus
Educational establishment «Brest state university named after A. S. Pushkin»

Scientific Proceeding

Of Brest University

Collection of scientific works

Issue 15

Part 2
Natural Sciences

Brest • 2019

Founded 2005

Editor-in-chief
A. M. Sender
Editor-in-chief Deputies
S. M. Sevyaryn *(part 1. The Humanities and Social Sciences*)
A. Ya. Budzko *(part 2. The Natural Sciences)*
Editorial council:
V. E. Gaiduk, K. K. Krasouski, L. G. Lysyuk, B. M. Lyapeshka, Z. P. Melnikava, A. F. Ravinski
International council:
A. A. Afonin (Russia), F. Ya. Vasilyuk (Russia), V. A. Glavan (Maldova),
Martin Grabe (Germany), M. M. Gromau (Russia), V. V. Dzikusar (Russia), Andrash Zoltan (Hungary),
Anton Miranovich (Poland), V. A. Nestsiarouski (Ukraine), Ezhy Nikitarovich (Poland),
Stanislav Rudalf (Poland), B. V. Salikhau (Russia), V. G. Samoilenka (Ukraine),
Felix Chizheuski (Poland), Antani Yuvka (Poland), Edvard Yarmakh (Poland)
Editorial board:
G. I. Zaimist *(managerial editor part 1. The Humanities and Social Sciences),*
N. S. Stupen *(managerial editor part 2. The Natural Sciences),*
V. V. Amelkin, S. V. Artsyomenka, M. A. Bahdasarau, V. F. Bainyou, V. U. Budkevich,
A. M. Vabishchevich, I. Ya. Valitava, V. N. Vatyl, P. A. Vadapyanau, A. N. Vitchanka, A. A. Volchak,
T. A. Garupa, A. M. Gryharovich, A. A. Guzhalouski, A. L. Gulevich, T. I. Dounar, M. P. Zygar,
V. I. Iuchankau, M. S. Kavalevich, T. A. Kavalchuk, C. S. Kirvel, U. L. Klyunya, P. P. Krus,
V. V. Loseu, A. A. Lukashanets, M. I. Lyauchuk, V. S. Manakhau, Y. F. Martynau, A. A. Makhnach,
A. V. Matsveyeu, U. A. Pletsukhou, S. V. Rashetnikau, D. G. Rotman, V. F. Rusetski,
A. A. Savich, V. S. Sekyarzhytski, M. M. Sender, V. A. Senkavets, E. V. Skakun, E. S. Slyapovich,
V. A. Stsepanovich, V. I. Syankevich, L. R. Tsitarenka, N. N. Trush, I. A. Shved,
Y. K. Yalovichava, Y. S. Yaskevich

Publishing house address:
224665, Brest, Boulevard Cosmonauts, 21
tel.: 21-72-07
e-mail: *vesnik@brsu.brest.by*

ISBN 978-985-22-0076-9 (p. 2)
ISBN 978-985-22-0074-5

© EE «BrSU named after A. S. Pushkin», 2019

Scientific Proceeding

of Brest University

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

2019 • Issue 15 • Part 2

INDEX

MATHEMATICS

Gritsuk D. V. Invariants of Partially Soluble Groups with Restrictions on Cofactors 7

Matysik O. V. Implicit Iteration Process for the Approximate Solving of Operator Equations of the First Kind 15

PHYSICS

Sekerzhitsky V. S. On the Question of Equations State of Extremely Degenerate Ideal Fermi-Gases in Magnetic Field 26

CHEMISTRY

Bohoslavets M. M., Chelyadyn L. I., Medvid M. I. Physical, Electrical and Chemical Aspects of Technology of Infiltrates Treatment of Domestic Waste Landfills 34

Stupen N. S. Development of the Periodic System of Chemical Element 41

BIOLOGY

Abramova I. V., Gaiduk V. E. The Synanthropization and the Urbanization of the Common Pigeon (*Columba livia*, Columbiformes) in Southwest of Belarus..... 54

Boyko V. I., Volosyuk S. N. Anatomical Characteristics of the Bark of an Annual Stem of Some Shrub Angiosperms..... 60

Lenivko S. M. Genetic Engineering Approach in Creating New Forms of Plants Resistant to Abiotic Factors 67

Matusevich N. M., Zigar M. P. Phellogen Laying and Peridermal Formation in Some Rosaceae..... 73

Savaneuski M. K., Khomich H. E. Analysis of Slow Wave Oscillations of Functioning as One of the Research Methods of Cardiovascular System 81

Shkuratova N. V. The Composition of Invasive Plants in the Urbanized Territories on the Example of a Recreational Zone of the Park of Soldiers-Internationalists in Brest 89

SCIENCES ON EARTH

Grechanik N. F. Petrographic Composition of the Clastic Material from the Ablation Morena on the Territory of Vysokoe Plain 98

Korjenevich S. V. Present Day State and Prognosis of Demographic Situation Development on the Belarusian Polesye..... 110

Shevchenko A. L., Osadchy V. I., Charny D. V. Changes of the Regime, Balance and Resources of Underground Waters of Polesye and Forest-Steppe of Ukraine under the Influence of Global Warming 117

Bogdasarov M. In Memory of the Scientist..... 129

УДК 512.542

Д. В. Грицук
[1]канд. физ.-мат. наук, зав. каф. прикладной математики и информатики
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: [1]dmitry.gritsuk@gmail.com

ИНВАРИАНТЫ КОНЕЧНЫХ ЧАСТИЧНО РАЗРЕШИМЫХ ГРУПП С ОГРАНИЧЕННЫМИ КОФАКТОРАМИ*

К инвариантам конечной частично разрешимых групп относят p-длину, π-длину, нильпотентную π-длину и произвоную π-длину. В разделе 1 приведены результаты, устанавливающие оценки производной π-длины π-разрешимой группы с ограничениями на порядки кофакторов или индексы нормальных замыканий подгрупп. В разделе 2 содержится описание формационного строения разрешимой группы, у которой подгруппы из факторов имеют ограничения на индексы фиттинговых p-подгрупп в своих нормальных замыканиях. В разделе 3 перечислены оценки инвариантов π-разрешимых групп, у которых силовские подгруппы из факторов имеют заданные ограничения (циклические, метациклические, бициклические, бициклические или свободны от четвертых степеней). В разделе 4 приведены оценки производной π-длины π-разрешимых групп, у которых индексы нормальных замыканий или кофакторы подгрупп из факторов ограничены.

Введение

Все рассматриваемые группы предполагаются конечными. Используются обозначения, принятые в книгах [1; 2]. Пусть P – множество всех простых чисел, а π – некоторое подмножество простых чисел. Дополнение к π во множестве P обозначается через π'. Группа называется π-группой, если все простые делители порядка группы принадлежат множеству π, и π'-группой – в противном случае.

Ряд подгрупп

$$1 = G_0 \subseteq G_1 \subseteq G_2 \subseteq \cdots \subseteq G_m = G \qquad (1)$$

называется субнормальным, если для любого i подгруппа G_i нормальна в G_{i+1}. Фактор-группы G_{i+1}/G_i называются факторами этого ряда. Если в (1) нет совпадающих подгрупп, что число n называется длиной ряда.

Производная (нильпотентная) длина группы G определяется как длина самого короткого нормального ряда (1) с абелевыми (нильпотентными) факторами. Эти длины обозначаются через $d(G)$ и $n(G)$ соответственно. Ясно, что нильпотентная длина не превышает производную длину для любой разрешимой группы.

Пусть p – простое число. Пусть G – p-разрешимая группа. Тогда она обладает субнормальным рядом (1), каждый фактор которого является либо p-фактором, либо p'-фактором. Наименьшее число p-факторов среди всех таких субнормальных рядов называется p-длиной p-разрешимой группы и обозначается через $l_p(G)$. Данное понятие предложили Ф. Холл и Г. Хигмэн [3] в 1956 г. и установили зависимость p-длины p-разрешимой группы от некоторых инвариантов ее силовской p-подгруппы. В 1967 г. Л. А. Шеметков [4] распространил понятие p-длины на произвольные группы и доказал, что p-длина любой группы не превышает минимального числа образующих ее силовской p-подгруппы. Оценкам p-длины посвящены работы А. Х. Журтова и С. А. Сыскина [5], В. С. Монахова и О. А. Шпырко [6; 7], А. А. Трофимука [8–10].

**В статье приводится обзор результатов, полученных в рамках темы исследования, выполняемого при финансовой поддержке БРФФИ (проект № Ф17М-063).*

В 2013 г. Е. И. Хухро и П. В. Шумятский [13] предложили понятия неразрешимой и не-p-разрешимой длин и доказали, что не-p-разрешимая длина конечной группы не превышает наибольшей из p-длин ее p-разрешимых подгрупп.

Аналогом p-длины для π-разрешимой группы является понятие π-длины. Пусть G – π-разрешимая группа. Тогда она обладает субнормальным рядом (1), каждый фактор которого является либо либо π-фактором, либо π'-фактором. Наименьшее число π-факторов среди всех таких субнормальных рядов группы G называется π-длиной π-разрешимой группы G и обозначается через $l_\pi(G)$. С понятием π-длины связана следующая проблема Л. А. Шеметкова [11]: верно ли, что для любого непустого множества π простых чисел π-длина π-разрешимой группы ограничена сверху производной длиной ее π-холловой подгруппы? Эта проблема рассматривалась в работе Л. С. Казарина [12], где получен положительный ответ в случае, когда $2 \notin \pi$.

В 1968 г. Р. Картер, Б. Фишер и Т. Хоукс [14] ввели понятие нильпотентной π-длины разрешимой группы как обобщение нильпотентной длины и p-длины одновременно. Они доказали, что класс всех разрешимых групп ограниченной нильпотентной π-длины является наследственной насыщенной формацией и описали ее локальный экран.

Для π-разрешимой группы аналогом нильпотентной длины является понятие нильпотентной π-длины. Пусть G – π-разрешимая группа. Тогда она обладает субнормальным рядом (1), каждый фактор которого является либо нильпотентным π-фактором, либо π'-фактором. Наименьшее число нильпотентных π-факторов среди всех таких субнормальных рядов группы G называется нильпотентной π-длиной π-разрешимой группы G и обозначается через $l_\pi^n(G)$. Ясно, что в случае, когда $\pi = \pi(G)$, значение $l_\pi^n(G)$ совпадает со значением нильпотентной длины группы G. Одной из первых работ по нильпотентной π-длине π-разрешимой группы была статья М. Нумата [15], в которой она ограничена числом классов сопряженных ненормальных максимальных подгрупп, чьи индексы принадлежат π. Оценкам нильпотентной π-длины посвящены работы В. С. Монахова и О. А. Шпырко [6; 7].

В 2006 г. В. С. Монахов [16] предложил аналог производной длины для π-разрешимой группы – понятие производной π-длины π-разрешимой группы. Пусть G – π-разрешимая группа. Тогда она обладает субнормальным рядом (1), каждый фактор которого является либо абелевым π-фактором, либо π'-фактором. Наименьшее число абелевых π-факторов среди всех таких субнормальных рядов группы G называется производной π-длиной π-разрешимой группы G и обозначается через $l_\pi^a(G)$. Ясно, что в случае, когда $\pi = \pi(G)$, значение $l_\pi^a(G)$ совпадает со значением производной длины группы G. Оценкам производной π-длины π-разрешимой группы с заданной π-холловой подгруппой либо силовскими подгруппами посвящены работы [17–22]. Естественно возникает вопрос о влиянии строения кофакторов на производную π-длину π-разрешимой группы.

1. Исследование строения π-разрешимой группы с ограничениями на порядки кофакторов или индексы нормальных замыканий подгрупп

Пусть n и m – натуральные числа. Говорят, что число n свободно от m-х степеней, если p^m не делит n для всех простых p. В частности, при $m = 2$ говорят, что n свободно от квадратов, при $m = 3$ – свободно от кубов.

Напомним, что кофактором подгруппы H группы G называется фактор-группа $H/\mathrm{Core}_G H$, где $\mathrm{Core}_G H$ – ядро подгруппы H в группе G, т. е. наибольшая нормальная

подгруппа в G, содержащаяся в H. В дальнейшем кофактор подгруппы H в группе G будем обозначать $\mathrm{Cof}_G(H)$.

В [23] изучено строение группы с циклическими кофакторами примарных подгрупп. В частности, доказано, что p-длина таких групп не превышает 1 для всех простых p. Строение разрешимых групп с бициклическими кофакторами примарных подгрупп приведено в [24]. Из следствия 4.2 работы [23] и основной теоремы работы [25] следует описание групп с порядками кофакторов подгрупп, свободными от квадратов. В частности, производная длина такой группы G не превышает 4, нильпотентная длина не превышает 3, а p-длина не превышает 1 для всех простых p.

В теоремах 1.1 и 1.2 отмеченные выше результаты, связанные с кофакторами подгрупп, распространены на случай π-разрешимых групп.

Теорема 1.1 [26]. *Пусть G – p-разрешимая группа. Если $Cof_G(X)$ свободен от $(n+1)$-степеней, где X – произвольная p-подгруппа группы G, то $l_p^a(G/\Phi(G)) \leq \frac{n^2+n+2}{4}$ для $p \notin \{2,3\}$ и $l_p^a(G/\Phi(G)) \leq \frac{n^2+n+4}{4}$ для $p \in \{2,3\}$.*

Следствие. *Пусть G – p-разрешимая группа. Если порядок $Cof_G(X)$ свободен от квадратов, где X – произвольная p-подгруппа группы G, то $l_p^a(G/\Phi(G)) \leq 2$.*

Теорема 1.2 [26]. *Пусть G – π-разрешимая группа. Если $Cof_G(X)$ циклический, где X – произвольная p-подгруппа группы G и $p \in \pi$, то $l_\pi^a(G/\Phi(G)) \leq 2$, если $2 \notin \pi$, и $l_\pi^a(G/\Phi(G)) \leq 4$, если $2 \in \pi$.*

Следствие. *Пусть G – π-разрешимая группа. Если $Cof_G(X)$ свободен от квадратов, где X – произвольная π-подгруппа группы G, то $l_\pi^a(G/\Phi(G)) \leq 4$.*

2. Изучение формационного строения разрешимой группы, у которой подгруппы из факторов имеют заданные ограничения

Главным рядом группы G называется цепочка подгрупп

$$1 = G_0 \subseteq G_1 \subseteq \cdots \subseteq G_m = G,$$

в которой для каждого $i = 1,2,\ldots,m-1$ подгруппа G_i/G_{i-1} является минимальной нормальной подгруппой в группе G/G_{i-1}. Фактор-группы G_i/G_{i-1} называются главными факторами группы G.

Пусть p – простое число. Если G – p-разрешимая неединичная группа, то ее главные факторы являются либо p-группами, либо p'-группами. Главный фактор группы G, который является p-группой, называется p-главным фактором группы G. Если p^n – наибольший из порядков p-главных факторов группы G, то n называют p-рангом группы G и обозначают через $r_p(G)$ [1, с. 685].

Разрешимая группа p-разрешима для каждого p. Рангом неединичной разрешимой группы G называют $\max_{p\in\pi(G)} r_p(G)$. Здесь $\pi(G)$ – совокупность всех простых делителей порядка группы G. Ранг разрешимой группы G обозначают через $r(G)$.

Пусть H и K – нормальные подгруппы группы G. Напомним, что фактор-группа H/K называется фиттинговой, если $H \subseteq F(G)$. Здесь $F(G)$ – подгруппа Фиттинга группы G.

Б. Хупперт [27] показал, что разрешимая группа тогда и только тогда является сверхразрешимой, когда фиттинговы главные факторы имеют простые порядки. Я. Г. Беркович [28] продолжил исследования в данном направлении и обнаружил, что разрешимая группа имеет главный ранг, не превосходящий 2, тогда и только тогда,

когда порядки ее фиттинговых главных факторов свободны от кубов. В работе [9] получены новые свойства разрешимых групп главного ранга 2 и проведено полное изучение разрешимых группы главного ранга 3. Р. Бэр ([29], VI.9.9) установил, что если на участке нормального ряда разрешимой группы между подгруппой Фраттини и подгруппой Фиттинга факторы имеют простые порядки, то группа сверхразрешима.

В 1978 г. Гашюц [30, следствие 6] установил справедливость следующего утверждения: если H/K – главный фактор наибольшего порядка разрешимой группы G, то подгруппа $H \leq F(G)$. Развивая этот результат, В. С. Монахов [31, теорема 2] доказал существование в разрешимых группах фиттинговых главных факторов порядка $p^{r(G/\Phi(G))}$, где p – простое число, $\Phi(G)$ – подгруппа Фраттини группы G, $r(G/\Phi(G)$ – главный ранг группы $G/\Phi(G)$.

Исследование влияния Фиттинговых факторов на строение группы также проведено в работах [32–35]. Например, в [32] найдена зависимость оценки производной длины разрешимой группы от порядков силовских подгрупп из ее подгруппы Фиттинга, в [33] получены оценки инвариантов разрешимой группы, у которой на участке нормального ряда между подгруппой Фраттини и подгруппой Фиттинга силовские подгруппы факторов являются бициклическими, в [34] исследованы разрешимые группы с нормальным рангом подгруппы Фиттинга, не превышающим 2.

Теоремы 2.1 и 2.2 являются развитием отмеченных выше работ.

Пусть G – p-разрешимая группа. Рассмотрим функцию

$$t_p^F(G) = \max\{n | p^n \top |H^G : H|, \qquad H \leq F_p(G)\}, p \in \pi(G).$$

Следуя Б. Хупперту, будем использовать запись $p^m \top |H^G : H|$ для обозначения того, что p^m делит $|H^G : H|$, а p^{m+1} не делит $|H^G : H|$. Кроме того, H^G – наименьшая нормальная подгруппа группы G, содержащая H, а $F_p(G)$ – наибольшая нормальная p-нильпотентная подгруппа группы G.

Теорема 2.1 [26]. *Пусть G – p-разрешимая группа. Тогда $l_p^a(G/\Phi(G)) \leq \frac{(t_p^F(G))^2+t_p^F(G)+6}{4}$ для $p \notin \{2,3\}$ и $l_p^a(G/\Phi(G)) \leq \frac{(t_p^F(G))^2+t_p^F(G)+8}{4}$ для $p \in \{2,3\}$.*

Следствие 1. *Пусть G – p-разрешимая группа.*

1) Если $t_p^F(G) \leq 1$, то $l_p^a(G/\Phi(G)) \leq 2$.

2) Если $t_p^F(G) \leq 2$, то $l_p^a(G/\Phi(G)) \leq 3$.

Следствие 2. *Пусть G – разрешимая группа и $t^F(G) \leq 2$. Тогда $G \in \mathfrak{N}\mathfrak{A}^5$ и $d(G/\Phi(G)) \leq 6$, $n(G) \leq 4$. В частности, если группа A_4-свободна, то $G \in \mathfrak{N}\mathfrak{A}^4$ и $d(G/\Phi(G)) \leq 5$.*

Группа называется A_4-свободной, если она не содержит секций изоморфных знакопеременной группе A_4.Формации всех нильпотетных и абелевых групп обозначают через $\mathfrak{N}$ и $\mathfrak{A}$ соответственно.

3. Исследование строения π-разрешимой группы, у которой силовские подгруппы из факторов имеют заданные ограничения

Нахождение инвариантов разрешимых групп с заданными свойствами силовских подгрупп нашло развитие в исследовании строения групп по свойствам силовских подгрупп в факторах их нормальных рядов.

Если у группы G имеется нормальный ряд с циклическими силовскими подгруппами в факторах, то несложно проверить, что G сверхразрешима. Поэтому группа G дисперсивна по Оре, ее коммутант нильпотентен, и нильпотентная длина

группы G не выше 2. Поскольку любая p-группа имеет нормальный ряд с факторами простых порядков, то производную длину таких групп ограничить сверху нельзя. Однако производная длина фактор-группы $G/\Phi(G)$ будет не выше 2.

Исследование разрешимых групп, обладающих нормальным рядом, факторы которого имеют бициклические силовские подгруппы, проведено в 2009 г. в работе [10]. В частности, получены оценки инвариантов (производной длины, нильпотентной длины и p-длины) таких разрешимых групп. В 2013 г. [33] получено развитие теоремы Бэра о сверхразрешимости группы, у которой на участке нормального ряда разрешимой группы между подгруппой Фраттини и подгруппой Фиттинга, факторы имеют простые порядки. В частности, получены оценки производной длины, нильпотентной длины и p-длины разрешимой группы, у которой на участке нормального ряда между подгруппой Фраттини и подгруппой Фиттинга силовские подгруппы факторов являются бициклическими.

Развитием данного направления иследования частично разрешимых групп является теорема 3.1.

Теорема 3.1 [36]. *Пусть G – π-разрешимая группа. Если группа G обладает нормальным рядом, силовские подгруппы π-факторов которого являются:*

1) циклическими, то $l_\pi(G) \leq 1, l_\pi^n(G) \leq l_\pi^a(G) \leq 2$;

2) метациклическими, то $l_\pi(G) \leq 2, l_\pi^n(G) \leq 4, l_\pi^a(G) \leq 10$, если $2 \in \pi$;

3) бициклическими, то $l_\pi(G) \leq 2, l_\pi^n(G) \leq 4, l_\pi^a(G) \leq 10$, если $2 \in \pi$;

4) либо бициклическими, либо свободными от четвертых степеней, то

$$l_\pi(G) \leq 3, l_\pi^n(G) \leq 4, l_\pi^a(G) \leq 18, \text{ если } 2 \in \pi.$$

4. Исследование строения π-разрешимой группы, у которой индексы нормальных замыканий или кофакторы подгрупп из факторов ограничены

Хорошо известно, что свойство нормальности подгруппы в группе не является транзитивным. В 1957 г. Гашюц [37] установил строение разрешимых групп, у которых нормальность обладает транзитивным свойством (t-группы). Такие группы можно представить в виде полупрямого произведения нормальной абелевой холловой подгруппы нечетного порядка и дедекиндовой подгруппы. Группы, близкие к t-группам, можно определять при помощи дефекта субнормальной подгруппы H, т. е. длины наименьшего субнормального ряда от подгруппы H до группы G. Очевидно, что каждая собственная нормальная подгруппа имеет дефект 1, поэтому в t-группах все субнормальные подгруппы имеют дефект 1. Группы с субнормальными подгруппами дефекта 2 исследовались в [38].

В теории групп всякую подгруппу H группы G можно окружить двумя нормальными в G подгруппами – нормальным замыканим H^G и ядром H_G, где H^G является наименьшей нормальной в G подгруппой, содержащей H, а H_G – наибольшей нормальной в G подгруппой, содержащейся в H. Понятно, что в t-группах $|H^G: H| = |H: H_G| = 1$ для каждой субнормальной подгруппы H. Если G не является t-группой, то $|H^G: H| > 1, |H: H_G| > 1$ для каждой субнормальной ненормальной подгруппы H.

В работе [39] Го Вэньбинь, Ху Бинь и В. С. Монахов изучили инварианты разрешимой группы G в зависимости от значений числовой функции $t(G)$, определенной следующим образом:

$$t_p(G) = \max\{n | p^n \top |H^G: H|, H \text{ sn } G\}, p \in \pi(G).$$
$$t(G) = max_{p \in \pi(G)}(t_p(\mathrm{G})).$$

Следуя Б. Хупперту, будем использовать запись $p^m \top |H^G : H|$ для обозначения того, что p^m делит $|H^G : H|$, а p^{m+1} не делит $|H^G : H|$. Запись $H \operatorname{sn} G$ обозначает, что подгруппа H субнормальна в группе G.

Если $t(G) = 0$, то $H^G = H$ для всех субнормальных подгрупп H группы G и группа G становится t-группой. В [25] в зависимости от значений $t(G)$ найдены верхние границы нильпотентной, производной и p-длины разрешимой группы G.

В работе [40] решена двойственная задача: исследованы инварианты разрешимой группы G в зависимости от канонических разложений порядков кофакторов субнормальных подгрупп.

В теореме 4.1 рассмотренные выше результаты работ [39] и [40] распространены на случай π-разрешимых групп.

Теорема 4.1. *Пусть G – π-разрешимая группа. Тогда $l_\pi^a(G/\Phi(G)) \leq 2$, если $2 \notin \pi$, и $l_\pi^a(G/\Phi(G)) \leq 4$, если $2 \in \pi$ в каждом из следующих случаев:*

1) порядок кофактора H/H_G свободен от квадратов, где H – произвольная субнормальная подгруппа G;

2) индекс $|H^G : H|$ свободен от квадратов, где H – произвольная субнормальная подгруппа G.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huppert, B. Endliche Gruppen I / B. Huppert. – Berlin ; Heidelberg ; New York, 1967.

2. Монахов, В. С. Введение в теорию конечных групп и их классов / В. С. Монахов. – Минск : Выш. шк., 2006. – 207 с.

3. Hall, P. The p-lengh of a p-soluble groups and reduction theorems for Burnside's problem / P. Hall, G. Higman // Proc. London Math. Soc. – 1956. – Vol. 3, № 7. – P. 1–42.

4. Шеметков, Л. А. О частично разрешимых конечных группах / Л. А. Шеметков // Мат. сб. – 1967. – Т. 72 (114), № 1. – С. 97–107.

5. Журтов, А. Х. О группах Шмидта / А. Х. Журтов, С. А. Сыскин // Сиб. мат. журн. – 1987. – Т. 28, № 2. – С. 74–78.

6. Монахов, В. С. О нильпотентной π-длине конечных π-разрешимых групп / В. С. Монахов, О. А. Шпырко // Дискрет. математика. – 2001. – Т. 13, вып. 3. – С. 145–152.

7. Монахов, В. С. О нильпотентной π-длине максимальных подгрупп конечных π-разрешимых групп / В. С. Монахов, О. А. Шпырко // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1, Математика. Механика. – 2009. – № 6. – С. 3–8.

8. Монахов, В. С. Конечные разрешимые группы, силовские p-подгруппы которых либо бициклические, либо имеют порядок p^3 / В. С. Монахов, А. А. Трофимук // Фундам. и приклад. математика. – 2009. – Т. 15, № 2. – С. 121–131.

9. Монахов, В. С. О конечных разрешимых группах фиксированного ранга / В. С. Монахов, А. А. Трофимук // Сиб. мат. журн. – 2011. – Т. 52, № 5. – С. 1123–1137.

10. Monakhov, V. S. On a Finite Group Having a Normal Series Whose Factors Have Bicyclic Sylow Subgroups / V. S. Monakhov, A. A. Trofimuk // Communications in Algebra. – 2011. –Vol. 39, № 9. – P. 3178–3186.

11. Коуровская тетрадь: неразрешимые вопросы теории групп. № 18. – Новосибирск : Ин-т математики им. С. Л. Соболева, 2014. – 253 с.

12. Kazarin, L. S. Soluble products of groups / L. S. Kazarin // Infinite groups 94. – New York ; Berlin : Walter de Gruyter, 1995. – P. 111–123.

13. Khukhro, E. I. Nonsoluble and non-p-soluble length of finite groups / E. I. Khukhro, P. Shumyatsky // Cornell University Library. – 2013. – 1 Sept. – 14 p.

14. Carter, R. Extreme Classes of finite soluble groups / R. Carter, B. Fischer, T. Hawkes // J. Algebra. – 1968. – Vol. 9, № 3. – P. 285–313.

15. Numata, M. On the π-nilpotent length of π-solvable groups / M. Numata // Osaka J. Math. – 1971. – Vol. 8. – P. 447–451.

16. Монахов, В. С. Конечные группы с полунормальной холловой подгруппой / В. С. Монахов // Мат. заметки. – 2006. – Т. 80, № 4. – Р. 573–581.

17. Грицук, Д. В. О производной π-длине π-разрешимой группы / Д. В. Грицук, В. С. Монахов, О. А. Шпырко // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2012. – № 3. – С. 90–95.

18. Monakhov, V. S. On derived π-length of a finite π-solvable group with supersolvable π-Hall subgroup / V. S. Monakhov, D. V. Gritsuk // Algebra and Discrete Mathematics. – 2013. – Vol. 16, № 2. – P. 233–241.

19. Грицук, Д. В. О конечных π-разрешимых группах с бициклическими силовскими подгруппами / Д. В. Грицук, В. С. Монахов, О. А. Шпырко // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 1 (15). – С. 61–66.

20. Грицук, Д. В. Зависимость производной p-длины p-разрешимой группы от порядка ее силовской p-подгруппы / Д. В. Грицук // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 3 (20). – С. 58–60.

21. Грицук, Д. В. О разрешимых группах, силовские подгруппы которых абелевы или экстраспециальны / Д. В. Грицук, В. С. Монахов // Тр. ин-та математики. – 2012. – Т. 20, № 2. – С. 3–9.

22. Монахов, В. С. О производной π-длине конечной π-разрешимой группы с заданной π-холловой подгруппой / В. С. Монахов, Д. В. Грицук // Тр. ин-та математики и механики УрО РАН. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 215–223.

23. Liu, Yu. Finite groups in which primary subgroups have cyclic cofactors / Yu. Liu, X. Yi / Bull. Malays. Math. Sci. Soc. – 2011. – Vol. 34, № 2. – P. 337–344.

24. Трофимук, А. А. Конечные разрешимые группы с бициклическими кофакторами примарных подгрупп / А. А. Трофимук, Д. Д. Даудов // Тр. ин-та математики. – 2016. – Т. 24, № 1. – С. 95–99.

25. Евтухова, С. М. Конечные группы с порядками кофакторов подгрупп, свободными от квадратов / С. М. Евтухова, В. С. Монахов // Докл. НАН Беларуси. – 2005. – Т. 49. – С. 26–29.

26. Грицук, Д. В. Производная p-длина p-разрешимой группы с ограниченными кофакторами / Д. В. Грицук, А. А. Трофимук // Изв. ГГУ им. Ф. Скорины. Естеств. науки. – 2019. – № 3 (114). – С. 147–152.

27. Huppert, B. Normalteiler and maximal Untergruppen endlicher gruppen / B. Huppert // Math. Z. – 1954. – Vol. 60. – P. 409–434.

28. Беркович, Я. Г. О разрешимых группах конечного порядка // Мат. сб. – 1967. – Т. 74 (116), № 1. – С. 75–92.

29. Baer, R. Supersolvable immersion / R. Baer // Can. J. Math. – 1959. – № 11. – P. 353–369.

30. Gashutz, W. Existenz und Konjugiertsein von Untergruppen, die in endlichen auflosbaren Gruppen durch gewisse Indexschranken definiert sind / W. Gashutz // J. Algebra. – 1978. – Vol. 53. – P. 389–394.

31. Монахов, В. С. К теореме Хупперта – Шеметкова / В. С. Монахов // Тр. ин-та математики. – 2008. – Т. 16, № 1. – С. 64–66.

32. Трофимук, А. А. Производная длина конечных групп с ограничениями на силовские подгруппы // Мат. заметки. – 2010. – № 87. – С. 287–293.

33. Трофимук, А. А. Конечные группы с бициклическими силовскими подгруппами в фиттинговых факторах / А. А. Трофимук // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 304–307.

34. Trofimuk, A. A. Solvable groups with restrictions on Sylow subgroups of the Fitting subgroup / A. A. Trofimuk // Asian-Eur. J. Math. – 2016. – Vol. 9 (2). – P. 1650037.

35. Трофимук, А. А. О Фиттинговых подгруппах конечной разрешимой группы / А. А. Трофимук // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 242–246.

36. Грицук, Д. В. Инварианты π-разрешимой группы, у которой силовские подгруппы из факторов имеют заданные ограничения / Д. В. Грицук, А. А. Трофимук, Т. В. Бондарук // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 4, Фізіка. Матэматыка. – 2018. – № 2. – С. 77–83.

37. Gaschütz, W. Gruppen, in denen das Normalteilersein transitiv ist / W. Gaschütz // J. Reine Angew. Math. – 1957. – Vol. 198. – P. 87–92.

38. McCaughan, D. J. Finite soluble groups whose subnormal subgroups have defect at most two / D. J. McCaughan, S. E. Stonehewer // Arth. Math. – 1980. – Vol. 35. – P. 56–60.

39. Guo, W. On indices of subnormal subgroups of finite soluble groups / W. Guo, B. Hu, V. S. Monakhov // Commun. Algebra. – 2004. – Vol. 33, № 3. – P. 855–863.

40. Monakhov, V. S. On cofactors of subnormal subgroups / V. S. Monakhov, I. L. Sokhor // Journal of Algebra and Its Applications. – 2016. – Vol. 15, № 9. – P. 1650169-1–1650169-9.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 23.10.2019

Gritsuk D. V. **Invariants of Partially Soluble Groups with Restrictions on Cofactors**

The invariants of a partially soluble group include the p-length, π-length, nilpotent π-length, and derived π-length. This article provides an overview of the results obtained by the authors in the framework of the research topic carried out with the financial support of the BRFFR (project No. F17M-063). In Section 1 lists the results that establish the estimates of the derived π-length of a π-soluble group in which the order of a cofactors or indices of normal closures of subgroups. Section 2 describes the formation structure of a solvable group in which subgroups of factors have restrictions on indices of fitting p-subgroups in their normal closures. Section 3 lists estimates of invariants of a π-soluble group in which Sylow subgroups of factors have given restrictions (cyclic, metacyclic, bicyclic, bicyclic or free from fourth degrees). Section 4 provides estimates of the derived π-length of a π-soluble group in which normal closure indices or cofactors of subgroups of factors are bounded.

УДК 519.6 + 517.983.54

О. В. Матысик
канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. прикладной математики и информатики
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: matysikoleg@mail.ru

НЕЯВНЫЙ ИТЕРАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ОПЕРАТОРНЫХ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОГО РОДА

Для решения линейных операторных уравнений первого рода с ограниченным положительным и самосопряженным оператором в гильбертовом пространстве предлагается неявный итерационный метод. Для этого метода исследуется априорный выбор числа итераций. Обосновывается применение правила останова по невязке, что делает предложенный метод эффективным и тогда, когда нет сведений об истокообразной представимости точного решения. В работе доказана сходимость итерационного метода, получена оценка для момента останова и решена модельная задача.

Введение

Встречается большой класс задач, где решения неустойчивы к малым изменениям исходных данных, т. е. сколь угодно малые изменения исходных данных могут приводить к большим изменениям решений. Задачи подобного типа принадлежат к классу некорректных задач.

Значительная часть задач, встречающихся в прикладной математике, физике, технике и управлении, может быть представлена в виде операторного уравнения первого рода

$$Ax = y, \quad x \in X, \quad y \in Y \tag{1}$$

с заданным оператором $A: X \to Y$ и элементом y, X и Y – метрические пространства, а в особо оговариваемых случаях – банаховы или даже гильбертовы. Ж. Адамаром (J. Hadamard) [1] было введено следующее понятие корректности:

Определение 1. *Задачу отыскания решения* $x \in X$ *уравнения* (1) *называют корректной (или корректно поставленной, или корректной по Адамару), если при любой фиксированной правой части* $y = y_0 \in Y$ *уравнения* (1) *его решение*:

а) существует в пространстве X *;*

б) определено в пространстве X *однозначно;*

в) устойчиво в пространстве X *, т. е. непрерывно зависит от правой части* $y \in Y$ *.*

В случае нарушения любого из этих условий задачу называют некорректной (некорректно поставленной); более конкретно при нарушении условия в) ее принято называть неустойчивой.

Из определения видно, что корректность по Адамару эквивалентна однозначной определенности и непрерывности обратного оператора A^{-1} на всем пространстве Y.

На протяжении многих лет в математике считалось, что только корректные задачи имеют право на существование, что только они правильно отражают реальный мир. О некорректных задачах сложилось мнение, что они не имеют физической реальности, поэтому их решение бессмысленно. В результате долгое время некорректные задачи не изучались. Однако на практике все чаще и настойчивее стала возникать необходимость решать некорректные задачи. К таким задачам относятся задача Коши для уравнения Лапласа, задача решения интегрального уравнения I-го рода, задача

дифференцирования функции, заданной приближенно, численное суммирование рядов Фурье, когда коэффициенты известны приближенно в метрике l_2, обратная задача гравиметрии, обратная задача теории потенциала, задача спектроскопии, задача аналитического продолжения функции, известной на части области, на всю область. Некорректны также и задача проектирования оптимальных систем, конструкций, задача создания систем автоматической обработки результатов физического эксперимента, задача Коши для уравнения теплопроводности с обращенным временем и т. д.

Однако обычные методы, применяемые для решения корректных задач, невозможно было применить к некорректным задачам, поэтому необходимо было пересмотреть определение корректности по Адамару. Это было сделано в 1943 г. А. Н. Тихоновым [2].

Определение 2. *Задача отыскания решения уравнения* (1) *называется корректной по Тихонову на множестве* $M \subset X$, *а множество* M *– ее классом корректности, если:*

а) точное решение задачи существует в классе M;

б) в классе M *решение задачи единственно при любой правой части* $y \in F = AM \subset Y$;

в) принадлежащее множеству M *решение задачи устойчиво относительно правых частей* $y \in F$.

Если $M = X$ и $F = Y$, то корректность по Тихонову совпадает с корректностью по Адамару.

После работ А. Н. Тихонова систематическое изучение некорректных задач и способов их решения началось в 1950-х гг., но особенно широкий размах оно приняло в последние 50 лет. Основные результаты отражены в монографиях М. М. Лаврентьева [3], А. Н. Тихонова и В. Я. Арсенина [4], В. К. Иванова, В. В. Васина и В. П. Тананы [5], О. А. Лисковца [6], Г. М. Вайникко и А. Ю. Веретенникова [7].

Наиболее общим из известных в настоящее время подходов к решению некорректных задач является подход, основанный на введенном А. Н. Тихоновым понятии регуляризатора.

Пусть имеется некорректная в классическом смысле задача математической физики.

Определение 3. *Параметрическое семейство операторов* $\{R_\alpha\}$, *действующих из пространства правых частей* Y *в пространство решений* X, *называется регуляризующим (регуляризующим алгоритмом или регуляризатором), если:*

1) при любом $\alpha > 0$ *оператор* R_α *определен на всем пространстве* Y;

2) если существует точное решение исходной задачи $x \in X$, *то для любого* $\delta > 0$ *существует* $\alpha(\delta)$ *такое, что для всех* $y_\delta \in Y$, $\|y - y_\delta\| \le \delta$ *имеет место соотношение* $\left\|R_{\alpha(\delta)} y_\delta - x\right\|_X \to 0, \quad \delta \to 0.$ *Параметр* α *называется параметром регуляризации,* $x_{\alpha,\delta} = R_{\alpha(\delta)} y_\delta$ *– регуляризованными решениями.*

Использование регуляризатора задачи дает возможность сколь угодно точного ее решения при достаточно точных исходных данных. В работе [8] А. Н. Тихонов предлагает способ построения регуляризующих операторов для уравнения (1). Это метод регуляризации решения некорректных задач. Он основан на вариационном принципе. В методе рационально выбирается параметр регуляризации, используется априорный способ выбора и предложены принципы невязки и сглаживающего функционала.

Для решения некорректных задач В. К. Иванов в работе [9] излагает метод квазирешений. Большое применение для регуляризации некорректных задач имеет

также и метод невязки, предложенный Д. Л. Филлипсом (D. L. Phillips) [10] и В. К. Ивановым [11].

Особое место среди методов решения некорректных задач занимают итерационные методы, поскольку они легко реализуются на ПЭВМ. Различные итерационные схемы решения некорректно поставленных задач были предложены в работах [12–23].

В настоящей статье предлагается неявный итерационный метод решения некорректных задач, представляющий собой семейство итерационных схем, зависящих от параметра k. Для рассматриваемого метода исследована сходимость в исходной норме гильбертова пространства, получены априорные оценки погрешности и априорный момент останова; обоснована возможность применения к методу правила останова по малости невязки; решена численная модельная задача.

Выбор параметра k и, следовательно, соответствующей схемы для решения некорректных задач зависит от степени s истокопредставимости точного решения $(x = A^s z, s > 0)$. В работе показано, что для $s \le 5$ целесообразно использовать предложенный метод при $k = 1$, для $6 \le s \le 27$ при $k = 2$ и т. д.

Сравнение предлагаемого метода с хорошо известным явным методом итераций [3; 7; 12–14; 16] $x_{n+1,\delta} = x_{n,\delta} + \alpha\left(y_\delta - Ax_{n,\delta}\right)$, $x_{0,\delta} = 0$ показывает, что порядки их оптимальных оценок одинаковы. Достоинство явных методов в том, что явные методы не требуют обращения оператора, а требуют только вычисления значений оператора на последовательных приближениях. В этом смысле явный метод [3; 7; 12–14; 16] предпочтительнее рассматриваемого неявного метода. Однако предлагаемый неявный метод обладает следующим важным достоинством. В явном методе [3; 7; 12–14; 16] на параметр α накладывается ограничение сверху – неравенство $0 < \alpha \le \dfrac{5}{4\|A\|}$, что может привести на практике к необходимости большого числа итераций. В предлагаемом неявном методе ограничений сверху на $\alpha > 0$ нет. Это позволяет считать $\alpha > 0$ произвольно большим (независимо от $\|A\|$), в связи с чем оптимальную оценку для неявного метода можно получить уже на первых шагах итераций.

Рассмотренный в статье итерационный метод найдет практическое применение в прикладной математике: он может быть использован для решения задач, встречающихся в теории оптимального управления, математической экономике, геофизике, теории потенциала, синтезе антенн, акустике, диагностике плазмы, в наземной или воздушной геологоразведке, при решении обратной кинематической задачи сейсмики, космических исследованиях (спектроскопии) и медицине (томографии) [13; 18–19; 21; 23–24].

1. Постановка задачи

В действительном гильбертовом пространстве H исследуется уравнение первого рода

$$Ax = y, \tag{2}$$

где A – положительный ограниченный и самосопряженный оператор, для которого нуль не является собственным значением, однако принадлежит спектру оператора A, и, следовательно, задача некорректна. Пусть $y \in R(A)$, т. е. при точной правой части y уравнение (2) имеет единственное решение x. Для отыскания этого решения предлагается неявная итерационная процедура

$$\left(E + \alpha^2 A^{2k}\right)x_{n+1} = \left(E - \alpha A^k\right)^2 x_n + 2\alpha A^{k-1} y, \quad x_0 = 0, \quad k \in N. \tag{3}$$

В случае приближенной правой части y_δ $\left(\|y-y_\delta\|\le\delta\right)$ соответствующие методу (3) итерации примут вид

$$\left(E+\alpha^2A^{2k}\right)x_{n+1,\delta}=\left(E-\alpha A^k\right)^2x_{n,\delta}+2\alpha A^{k-1}y_\delta,\quad x_{0,\delta}=0,\quad k\in N. \tag{4}$$

Ниже, как обычно, под сходимостью метода (4) понимается утверждение о том, что приближения (4) сколь угодно близко подходят к точному решению уравнения при подходящем выборе n и достаточно малых δ. Иными словами, метод (4) является сходящимся, если $\lim\limits_{\delta\to0}\left(\inf\limits_n\left\|x-x_{n,\delta}\right\|\right)=0$.

2. Сходимость метода в случае априорного выбора числа итераций

2.1. Сходимость при точной правой части. Воспользовавшись интегральным представлением положительно определенного самосопряженного оператора A и формулой (3), по индукции получим $x-x_n=\int\limits_0^M\lambda^{-1}\dfrac{\left(1-\alpha\lambda^k\right)^{2n}}{\left(1+\alpha^2\lambda^{2k}\right)^n}dE_\lambda y,$ где $M=\|A\|$, $E_\lambda-$ спектральная функция оператора A. Отсюда легко выводится сходимость итерационного процесса (3) при $n\to\infty$ для $\alpha>0$.

2.2. Сходимость при приближенной правой части. Итерационный процесс (4) является сходящимся, если нужным образом выбирать число итераций n в зависимости от уровня погрешности δ. Справедлива

Теорема 1. *Итерационный процесс (4) сходится при* $\alpha>0$*, если выбирать число итераций n в зависимости от* δ *так, чтобы* $n^{1/k}\delta\to0$ *при* $n\to\infty,\delta\to0.$

Доказательство теоремы аналогично доказательству подобной теоремы из [19; 21; 23]. При этом легко показывается оценка $\left\|x_n-x_{n,\delta}\right\|\le2k(n\alpha)^{1/k}\delta,\ n\ge1.$

2.3. Оценка погрешности. Скорость сходимости метода (4) будем оценивать при дополнительном предположении о возможности истокообразного представления точного решения x уравнения (2), т.е. $x=A^sz,\ s>0.$ Тогда $y=A^{s+1}z$ и, следовательно, получим $x-x_n=\int\limits_0^M\lambda^s\dfrac{\left(1-\alpha\lambda^k\right)^{2n}}{\left(1+\alpha^2\lambda^{2k}\right)^n}dE_\lambda z.$ Для оценки $\|x-x_n\|$ найдем максимум модуля подынтегральной функции $f(\lambda)=\lambda^s\dfrac{\left(1-\alpha\lambda^k\right)^{2n}}{\left(1+\alpha^2\lambda^{2k}\right)^n}$. Нетрудно показать, что при условии $\alpha>0$ справедливо неравенство $\|x-x_n\|\le s^{s/k}(2kn\alpha e)^{-s/k}\|z\|.$ Таким образом, общая оценка погрешности метода (4) запишется в виде

$$\left\|x-x_{n,\delta}\right\|\le\|x-x_n\|+\left\|x_n-x_{n,\delta}\right\|\le s^{s/k}(2kn\alpha e)^{-s/k}\|z\|+2k(n\alpha)^{1/k}\delta,\ n\ge1.$$

Для минимизации оценки погрешности вычислим ее правую часть в точке, в которой производная от нее равна нулю; в результате получим априорный момент останова $n_{\text{опт}} = s^{\frac{s+k}{s+1}}(2k)^{-\frac{s+k}{s+1}}\alpha^{-1}e^{-\frac{s}{s+1}}\delta^{-\frac{k}{s+1}}\|z\|^{\frac{k}{s+1}}$ и оптимальную оценку погрешности

$$\|x - x_{n,\delta}\|_{\text{опт}} \le (1+s)\left(\frac{s}{k}\right)^{\frac{s(1-k)}{k(s+1)}} e^{-\frac{s}{k(s+1)}}\delta^{\frac{s}{s+1}}\|z\|^{\frac{1}{s+1}}. \qquad (5)$$

Замечание 1. *Оценка погрешности* (5) *имеет порядок* $O\left(\delta^{s/(s+1)}\right)$ *и, как следует из* [7], *он является оптимальным в классе задач с истокообразно представимыми решениями* $x = A^s z,\ s > 0$.

Замечание 2. *Оптимальная оценка* (5) *не зависит от* α, *но от параметра* α *зависит* $n_{опт}$, *поэтому для уменьшения объема вычислительной работы следует брать* α *удовлетворяющим условию* $\alpha > 0$ *и так, чтобы* $n_{опт} = 1$. *Для этого достаточно выбрать* $\alpha_{\text{опт}} = s^{\frac{s+k}{s+1}}(2k)^{-\frac{s+k}{s+1}} e^{-\frac{s}{s+1}}\delta^{-\frac{k}{s+1}}\|z\|^{\frac{k}{s+1}}$.

Приведем погрешность метода (4) при счете с округлениями. Пусть $x_{n,\delta}$ – точное значение, полученное по формуле (4), а z_n – значение, полученное по той же формуле с учетом погрешностей вычисления γ_n, т. е.

$$z_{n+1} = \left(E + \alpha^2 A^{2k}\right)^{-1}\left[\left(E - \alpha A^k\right)^2 z_n + 2\alpha A^{k-1} y_\delta\right] + \alpha\gamma_n, \quad z_0 = 0.$$

Оценка погрешности метода (4) в этом случае имеет вид

$$\|x - z_n\| \le \|x - x_{n,\delta}\| + \|x_{n,\delta} - z_n\| \le s^{s/k}(2kn\alpha e)^{-s/k}\|z\| + 2k(n\alpha)^{1/k}\delta + n\alpha\gamma, \quad n \ge 1,$$

где $\gamma = \sup_i |\gamma_i|$.

Оценку $\|x - x_{n,\delta}\|_{\text{опт}}$ можно оптимизировать по k. Для этого производную по k от $\varphi(k) = (s/k)^{\frac{s(1-k)}{k(s+1)}} e^{\frac{-s}{k(s+1)}}$ приравняем к нулю. Получим $(s/k)^{\frac{s(1-k)}{k(s+1)}} e^{\frac{-s}{k(s+1)}} \cdot \frac{s}{k^2(s+1)} \times$ $\times\left(k - \ln\frac{s}{k}\right) = 0$. Отсюда видно, что оптимальное k должно удовлетворять равенству $k = \ln\frac{s}{k}$. Но k должно быть целым числом, поэтому, как показывают расчеты, для $s \le 5$ $k_{\text{опт}} = 1$, для $6 \le s \le 27$ $k_{\text{опт}} = 2$.

3. Апостериорный выбор числа итераций

Априорный выбор числа итераций n получен в предположении, что точное решение x уравнения (2) истокообразно представимо. Однако обычно сведения об истокообразности искомого решения неизвестны и тем самым приведенные в разделе 2 оценки

погрешности оказываются неприменимыми. Тем не менее метод (4) можно сделать вполне эффективным, если воспользоваться следующим правилом останова по невязке. Зададим уровень останова $\varepsilon > 0$ и момент m останова итерационного процесса (4) определим условием [7, 16, 19, 21–23]

$$\left\|Ax_{n,\delta} - y_\delta\right\| > \varepsilon,\ (n < m), \quad \left\|Ax_{m,\delta} - y_\delta\right\| \le \varepsilon,\ \varepsilon = b\delta,\ b > 1. \tag{6}$$

Предположим, что при начальном приближении невязка достаточно велика, а именно больше уровня останова, т. е. $\left\|Ax_{0,\delta} - y_\delta\right\| > \varepsilon$. Покажем возможность применения правила (6) к методу (4). Рассмотрим семейство функций $g_n(\lambda) = \lambda^{-1}\left[1 - \frac{\left(1-\alpha\lambda^k\right)^{2n}}{\left(1+\alpha^2\lambda^{2k}\right)^n}\right] \ge 0.$ Нетрудно показать (см. [21; 23]), что при $\alpha > 0$ для $g_n(\lambda)$ выполняются следующие условия

$$\sup_{0\le\lambda\le M} \left|g_n(\lambda)\right| \le 2k(n\alpha)^{1/k},\ n > 0,$$

$$\sup_{0\le\lambda\le M} \left|1-\lambda g_n(\lambda)\right| \le 1, \quad n > 0,$$

$$1-\lambda g_n(\lambda) \to 0,\ n \to \infty,\ \forall\lambda \in (0, M],$$

$$\sup_{0\le\lambda\le M} \lambda^s\left|1-\lambda g_n(\lambda)\right| \le s^{s/k}(2kn\alpha e)^{-s/k}, \quad n > 0,\ 0 \le s < \infty.$$

Аналогично подобным леммам из [7; 19; 21; 23] доказываются следующие леммы.

Лемма 1. *Пусть* $A = A^* \ge 0$, $\|A\| \le M$. *Тогда для* $\forall w \in H$ $(E - Ag_n(A))w \to 0,\ n \to \infty.$

Лемма 2. *Пусть* $A = A^* \ge 0$, $\|A\| \le M$. *Тогда для* $\forall \upsilon \in \overline{R(A)}$ *имеет место соотношение* $n^{s/k}\left\|A^s(E - Ag_n(A))v\right\| \to 0,\ n \to \infty,\ 0 \le s < \infty.$

Лемма 3. *Пусть* $A = A^* \ge 0$, $\|A\| \le M$. *Если для некоторых* $n_k < \bar{n} = const$ *и* $v_0 \in \overline{R(A)}$ *при* $k \to \infty$ *имеем* $w_k = A(E - Ag_{n_k}(A))v_0 \to 0,$ *то* $v_k = (E - Ag_{n_k}(A))v_0 \to 0.$

Леммы 1–3 использовались при доказательстве следующих теорем.

Теорема 2. *Пусть* $A = A^* \ge 0$, $\|A\| \le M$ *и пусть момент останова* $m = m(\delta)$ *в методе* (4) *выбирается по правилу* (6), *тогда* $x_{m(\delta),\delta} \to x$ *при* $\delta \to 0$.

Теорема 3. *Пусть выполнены условия теоремы* 2 *и пусть* $x = A^s z,\ s > 0$. *Тогда справедливы оценки* $m \le 1 + \frac{s+1}{2k\alpha e}\left[\frac{\|z\|}{(b-1)\delta}\right]^{k/(s+1)}$,

$$\left\|x_{m,\delta} - x\right\| \le \left[(b+1)\delta\right]^{s/(s+1)}\|z\|^{1/(s+1)} + 2k\alpha^{1/k}\left\{1 + \frac{s+1}{2k\alpha e}\left[\frac{\|z\|}{(b-1)\delta}\right]^{k/(s+1)}\right\}^{1/k}\delta. \tag{7}$$

Доказательство теорем 2–3 аналогично доказательству подобных теорем из [7; 19; 21; 23].

Замечание 3. *Порядок оценки* (7) *есть* $O\left(\delta^{\frac{s}{s+1}}\right)$, *и, как следует из* [7], *он оптимален в классе задач с истокообразно представимыми решениями* $x = A^s z,\ s > 0$.

Замечание 4. *Хотя формулировка теоремы* 3 *дается с указаниями степени истокопредставимости* s *и истокопредставляющего элемента* z, *на практике их значение не потребуется, т. к. они не содержатся в правиле останова* (6). *И тем не менее в теореме* 3 *утверждается, что будет автоматически выбрано количество итераций* m, *обеспечивающее оптимальный порядок погрешности. Но даже если истокопредставимость точного решения отсутствует, останов по невязке* (6), *как показывает теорема* 2, *обеспечивает сходимость метода, т. е. его регуляризующие свойства.*

4. Численный модельный пример

4.1. Формулировка и описание алгоритма решения модельной задачи.

Задача. Решаем в пространстве $L_2(0,1)$ модельную задачу в виде уравнения

$$\int_0^1 K(t,s)\, x(s)\, ds = y(t), \quad 0 \le t \le 1 \tag{8}$$

с симметричным положительным ядром $K(t,s) = \begin{cases} t(1-s),\ 0 \le t \le s \le 1, \\ s(1-t),\ 0 \le s \le t \le 1, \end{cases}$ точной правой частью $y(t) = \dfrac{t(t-1)\left(t^2 - t - 1\right)}{12}$ и точным решением $x(t) = t(1-t)$.

Обычно на практике мы не знаем точной функции $y(t)$, а вместо нее известны значения приближенной функции $\tilde{y}(t)$ в некотором числе точек с определенной, часто известной погрешностью δ, и по этим приближенным данным требуется приближенно найти решение. Чтобы имитировать эту ситуацию, будем считать заданными значения $\tilde{y}_i$, $i = \overline{1,m}$, полученные следующим образом: $\tilde{y}_i = [\, y(t_i) \cdot 10^k + 0{,}5] \,/\, 10^k$, где $y(t_i)$ – значения функции y(t) в точках t_i = ih, i = $\overline{1,m}$, h = $1/m$. Квадратные скобки означают целую часть числа и k = 4. При k = 4 величина погрешности $\delta = 10^{-4}$. Действительно, имеем $\int_0^1 [y(t) - \tilde{y}(t)]^2 dt \approx \sum_{i=1}^{m} [y(t_i) - \tilde{y}_i]^2 h \le mh\left(10^{-k}\right)^2 = 10^{-2k}$.

Заменим интеграл в уравнении (8) квадратурной суммой, например по формуле правых прямоугольников ($\int_a^b f(x)dx = h\sum_{k=1}^{n} y_k = h[y_1 + y_2 + \ldots + y_n]$, $h = \dfrac{b-a}{n}$, $y_k = f(x_k),\ x_k = a + kh$) с узлами $s_j = jh,\ \ j = \overline{1,m},\ \ h = 1/m$, т. е. $\int_0^1 K(t,s)x(s)ds \approx$ $\approx \sum_{j=1}^{m} K(t,s_j)hx_j$. Тогда получим равенство $\sum_{j=1}^{m} K(t,s_j)hx_j + \rho_m(t) = y(t)$, где $\rho_m(t)$ –

остаток квадратурной замены. Записав последнее равенство в точках $t_i = ih$, $i = \overline{1,m}$, получим уравнения $\sum_{j=1}^{m} K(t_i, s_j) h x_j + \rho_m(t_i) = y(t_i)$, $i = \overline{1,m}$.

Отбросив теперь остаточный член, получим линейную алгебраическую систему уравнений относительно приближенного решения

$$\sum_{j=1}^{m} K(t_i, s_j) h x_j = \tilde{y}_i, \quad i = \overline{1,m}. \tag{9}$$

Выберем для определенности $m = 32$ и будем решать систему (9) методом итераций (4) при k = 1, который в дискретной форме запишется

$$x_i^{(n+1)} + \alpha^2 \sum_{j=1}^{m} K(t_i, s_j) h \left(\sum_{l=1}^{m} K(t_j, s_l) h x_l^{(n+1)} \right) = x_i^{(n)} - 2\alpha \sum_{j=1}^{m} K(t_i, s_j) x_j^{(n)} h +$$
$$+\alpha^2 \sum_{j=1}^{m} K(t_i, s_j) h \left(\sum_{l=1}^{m} K(t_j, s_l) h x_l^{(n)} \right) + 2\alpha \tilde{y}_i, \quad x_i^{(0)} = 0, \quad i = \overline{1,m}. \tag{10}$$

При решении задачи итерационным методом (4) вычислялись:

$\left\| Ax^{(n)} - \tilde{y} \right\|_m = \left\{ \sum_{i=1}^{m} \left[\sum_{j=1}^{m} K(t_i, s_j) h x_j^{(n)} - \tilde{y}_i \right]^2 h \right\}^{1/2}$ – дискретная норма невязки,

$\left\| x^{(n)} \right\|_m = \left\{ \sum_{i=1}^{m} \left[x_i^{(n)} \right]^2 h \right\}^{1/2}$ – норма приближенного решения и дискретная норма разности между точным и приближенным решениями $\left\| x - x^{(n)} \right\|_m = \left\{ \sum_{i=1}^{m} \left[x(t_i) - x_i^{(n)} \right]^2 h \right\}^{1/2}$.

Оператор, описанный выше интегральным уравнением, непрерывен, взаимнооднозначен и аддитивен. Задача была решена методом (4) при $\delta = 10^{-4}$. Результаты счета приведены в таблице (ввиду симметрии приведена лишь половина таблицы). Для решения предложенной задачи сведений об истокопредставимости точного решения не потребовалось, так как здесь воспользовались правилом останова по невязке (4), выбрав уровень останова $\varepsilon = 1{,}5\delta$. Пример счета показал, что для достижения оптимальной точности методом итераций (4) при $\alpha = 9{,}4$ требуется только одна итерация, что соответствует результатам раздела 2.

На рисунке изображены графики точного решения и приближенного решения, полученного методом (4) при $\delta = 10^{-4}$.

4.2. Результат работы программы. Программа для решения предложенной задачи была написана на языке программирования C#.

Рисунок

Таблица

Узлы t_i	Правые части $y(t_i)$	Точное решение $x(t_i)$	Приближенное решение, полученное методом (4) $\delta = 10^{-4}$
0	0	0	0
0.0312	0.00259	0.03027	0.02429
0.0625	0.00517	0.05859	0.04865
0.0937	0.00768	0.08496	0.07275
0.125	0.01011	0.10938	0.09629
0.1562	0.01243	0.13184	0.11898
0.1875	0.01463	0.15234	0.14056
0.2187	0.01668	0.17089	0.1608
0.2500	0.01855	0.1875	0.17948
0.2812	0.02025	0.20215	0.19641
0.3125	0.02175	0.21484	0.21142
0.3437	0.02304	0.22559	0.22437
0.375	0.02411	0.23438	0.23514
0.4062	0.02495	0.24121	0.24361
0.4375	0.02555	0.24609	0.24972
0.4687	0.02591	0.24902	0.25341
0.5000	0.02604	0.25000	0.25464
$\left\| Ax^{(n)} - \tilde{y} \right\|_m$			0.00015
$\left\| x^{(n)} \right\|_m$			0.17972
$\left\| x - x^{(n)} \right\|_m$			0.00798

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hadamard, J. Le probleme de Cauchy et les equations aux derivees partielles lineaires hyperboliques / J. Hadamard. – Paris : Hermann, 1932.

2. Тихонов, А. Н. Об устойчивости обратных задач / А. Н. Тихонов // Докл. АН СССР. – 1943. – Т. 39, № 5. – С. 195–198.

3. Лаврентьев, М. М. О некоторых некорректных задачах математической физики / М. М. Лаврентьев. – Новосибирск : СО АН СССР, 1962. – 92 с.

4. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1979. – 288 с.

5. Иванов, В. К. Теория линейных некорректных задач и ее приложения / В. К. Иванов, В. В. Васин, В. П. Танана. – М. : Наука, 1978. – 206 с.

6. Лисковец, О. А. Вариационные методы решения неустойчивых задач / О. А. Лисковец. – Минск : Наука и техника, 1981. – 342 с.

7. Вайникко, Г. М. Итерационные процедуры в некорректных задачах / Г. М. Вайникко, А. Ю. Веретенников. – М. : Наука, 1986. – 178 с.

8. Тихонов, А. Н. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации / А. Н. Тихонов // Докл. АН СССР. – 1963. – Т. 151, № 3. – С. 501–504.

9. Иванов, В. К. О некорректно поставленных задачах / В. К. Иванов // Мат. сб. – 1963. – Т. 61 (103), № 2. – С. 211–223.

10. Phillips, D. L. A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind / D. L. Phillips // J. Accoc. Comput. Mach. – 1962. – Vol. 9, № 1. – P. 84–97.

11. Иванов, В. К. Теория приближенных методов и ее применение к численному решению сингулярных интегральных уравнений / В. К. Иванов. – Киев : Наук. думка, 1968. – 287 с.

12. Константинова, Я. В. Оценки погрешности в методе итераций для уравнений I рода / Я. В. Константинова, О. А. Лисковец // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1. – 1973. – № 1. – С. 9–15.

13. Самарский, А. А. Численные методы решения обратных задач математической физики / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : УРСС, 2004. – 480 с.

14. Денисов, А. М. Введение в теорию обратных задач / А. М. Денисов. – М. : МГУ, 1994. – 207 с.

15. Vogel, C. R. Computational methods for inverse problems / C. R. Vogel. – Philadelphia : SIAM, 2002. – 183 p.

16. Емелин, И. В. Правило останова в итерационных процедурах решения некорректных задач / И. В. Емелин, М. А. Красносельский // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 12. – С. 59–63.

17. Gilyazov, S.F. Regularization of ill-posed problems by iteration methods / S. F. Gilyazov, N. L. Gol'dman. – Dordrecht : Kluwer Acad. Publ., 2000. – 340 p.

18. Kabanikhin, S. I. Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications / S. I. Kabanikhin. – De Gruyter, 2011. – 459 p.

19. Савчук, В. Ф. Регуляризация операторных уравнений в гильбертовом пространстве / В. Ф. Савчук, О. В. Матысик. – Брест : БрГУ им. А. С. Пушкина, 2008. –196 с.

20. Забрейко, П. П. Теорема М. А. Красносельского и итерационные процедуры решения некорректных задач с самосопряженными операторами / П. П. Забрейко, О. В. Матысик // Докл. НАН Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 6. – С. 9–14.

21. Матысик, О. В. Явные и неявные итерационные процедуры решения некорректно поставленных задач / О. В. Матысик. – Брест : БрГУ им. А. С. Пушкина, 2014. – 213 с.

22. Matysik, O. V. Implicit iteration method of solving linear equations with approximating right-hand member and approximately specified operator / O. V. Matysik // J. Numer. Appl. Math. – 2014. – № 2 (116). – P. 89–95.

23. Матысик, О. В. Итерационная регуляризация некорректных задач / О. В. Матысик. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 188 с.

24. Верлань, А. Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. – Киев : Наук. думка, 1986. – 543 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 01.09.2019

Matysik O. V. **Implicit Iteration Process for the Approximate Solving of Operator Equations of the First Kind**

For the solution of linear operator equations of the first kind with a limited positive and self-adjoint operator in a Hilbert space is proposed implicit iteration method. For this method an a priori choice of the number of iterations. In the article justified the use of rule residual stop, which makes the proposed method is effective and when there is no information about sourcewise representation of the exact solution. We prove the convergence of the iteration method, the estimate for the moment stop and solved model problem.

УДК 524.354.6-33

В. С. Секержицкий
канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. общей и теоретической физики
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: otf@brsu.brest.by

К ВОПРОСУ ОБ УРАВНЕНИЯХ СОСТОЯНИЯ КРАЙНЕ ВЫРОЖДЕННЫХ ИДЕАЛЬНЫХ ФЕРМИ-ГАЗОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Получены уравнения состояния крайне вырожденных идеальных ферми-газов в магнитном поле. Рассмотрены нерелятивистское и ультрарелятивистское приближения, а также предельные случаи слабого и сверхсильного (превышающего квантовый предел) магнитных полей. Результаты могут найти применение при решении задач теоретической астрофизики, связанных с исследованиями физических свойств сверхплотного сильно замагниченного вещества и моделированием сверхплотных астрофизических объектов.

При решении задач теоретической астрофизики, связанных с моделированием сверхплотных астрофизических объектов типа белых карликов и нейтронных звезд, используются приближенные уравнения состояния сверхплотного вещества. Возможность наличия в веществе указанных объектов свободных фермионов и сильных магнитных полей делает актуальным вопрос о влиянии магнитного поля на уравнения состояния ферми-газов.

Рассмотрим сначала нерелятивистские ферми-газы. Следуя [1], в результате стандартных вычислений несложно получить выражение для большого термодинамического потенциала крайне вырожденного идеального нерелятивистского ферми-газа, находящегося в постоянном и однородном магнитном поле с индукцией B:

$$\Omega_j(B) = \Omega_j(B)\frac{R_{5/2}(x_j)}{R_{3/2}^{5/3}(x_j)}, \tag{1}$$

где

$$\Omega_j(0) = -\frac{2}{5}N_j\zeta_j(0), \qquad \zeta_j(0) = \frac{(3\pi^2)^{2/3}\hbar^2}{2m_j}n_j^{2/3}, \tag{2}$$

N_j – число фермионов в объеме V_j, $n_j = N_j/V_j$ – их концентрация, m_j – масса фермиона, $j = e, p, n$ – индексы, соответствующие электронному, протонному и нейтронному газам, $R_{5/2}(x_j)$ и $R_{3/2}(x_j)$ – безразмерные функции параметра $x_j = \dfrac{\zeta_j(B)}{\mu B}$, ζ_j – химический потенциал, для электронов μ – магнетон Бора μ_B, для нуклонов μ – ядерный магнетон $\mu_я$. Для заряженных фермионов

$$R_a(x_q) = a\sum_{n=0}^{l}\left(\left(x_q - 2n - 1 - \sigma_q\right)^{a-1} + \left(x_q - 2n - 1 + \sigma_q\right)^{a-1}\right), \tag{3}$$

$a = 3/2, 5/2$; $q = e, p$; $n = 0, 1, 2, \ldots$ – номер квантового уровня Ландау. В силу свойств функции распределения Ферми – Дирака суммирование в (3) ведется до тех пор, пока выражение под знаком соответствующего радикала неотрицательно. Для электронейтральной среды $n_p = n_e$ и

$$R_{3/2}\left(x_e\right)=R_{3/2}\left(x_p\right)=\frac{3\pi^2\hbar^3 n_p}{\left(2m_p\mu_я B\right)^{3/2}}; \tag{4}$$

здесь учтено, что $m_p\mu_я = m_e\mu_B$. Для нейтронов

$$R_a\left(x_n\right)=\frac{1}{2}\left(\left(x_n-\sigma_n\right)^a+\left(x_n+\sigma_n\right)^a\right), \tag{5}$$

причем $\left(x_n-\sigma_n\right)^a=0$ при $x_n\le\sigma_n$. Здесь $\sigma_j=\mu_j/\mu$, где μ_j – собственный магнитный момент фермиона. При выводе приведенных формул принималось, что спектр энергии свободного заряженного фермиона в квантующем магнитном поле

$$\varepsilon_q=\frac{p_{qz}^2}{2m_q}+\mu B\left(2n+1+2s\sigma_q\right), \tag{6}$$

а для нейтрона

$$\varepsilon_n=\frac{p_n^2}{2m_n}+2s\sigma_n\mu_я B, \tag{7}$$

p_{jz} – проекция импульса p_j фермиона на направление индукции магнитного поля, $s=\mp 1/2$. В (6), (7) энергия фермиона отсчитывается от величины $m_j c^2$.

Формулы (6) и (7) записаны в предположении, что величины σ_j от B не зависят. Это ограничивает применимость полученных соотношений условием $B < 10^{17}$ Гс для нуклонных газов. При $B > 10^{17}$ Гс циклотронная энергия пиона превышает энергию β^--распада нейтрона, и магнитный момент последнего зависит от B. Точная количественная теория этой зависимости до настоящего времени не разработана; качественно можно считать, что вследствие деформации в сверхсильном магнитном поле «пионной шубы» нуклона собственный магнитный момент последнего имеет тенденцию к уменьшению. Таким образом, здесь и далее мы полагаем $\sigma_p\approx 2{,}793$, $\sigma_n\approx 1{,}913$ [2].

Что же касается электронного газа, то $\sigma_e\approx 1{,}00116$ при $B << 4{,}414\cdot 10^{13}$ Гс. Аномальный магнитный момент электрона имеет довольно сложную зависимость от индукции магнитного поля при $B > 4{,}414\cdot 10^{13}$ Гс [2], но можно считать с достаточной степенью точности $\sigma_e\approx 1$ при любых значениях B.

Заметим также, что в обычных «земных» условиях нейтрон – нестабильная относительно бета-распада частица, и исследование физических свойств нейтронного газа представляет интерес лишь для физики сверхплотных астрофизических объектов, характерные плотности вещества которых превышают порог появления в электронно-ядерном веществе свободных нейтронов в качестве стабильного компонента ($\rho > 10^{11}$ г/см^3) [3].

Используя приведенные выше соотношения и метод термодинамических функций, получим выражения для химического потенциала ζ_j, давления P_j и средней полной энергии E_j крайне вырожденных идеальных нерелятивистских ферми-газов в постоянном и однородном магнитном поле с индукцией B:

$$N_j = -\left(\frac{\partial \Omega_j(B)}{\partial \zeta_j}\right)_{V_j,B}, \qquad \zeta_j(B) = \zeta_j(0)\frac{x_j}{R_{3/2}^{2/3}(x_j)}, \tag{8}$$

$$P_j(B) = -\frac{\Omega_j(B)}{V_j} = P_j(0)\frac{R_{5/2}(x_j)}{R_{3/2}^{5/3}(x_j)}, \tag{9}$$

$$E_j(B) = \Omega_j(B) + N_j\zeta_j(B) = \frac{2}{3}E_j(0)\frac{2{,}5x_jR_{3/2}(x_j) - R_{5/2}(x_j)}{R_{3/2}^{5/3}(x_j)} =$$

$$= P_j(0)V_j\frac{2{,}5x_jR_{3/2}(x_j) - R_{5/2}(x_j)}{R_{3/2}^{5/3}(x_j)}, \tag{10}$$

где

$$P_j(0) = \frac{2}{5}n_j\zeta_j(0), \qquad E_j(0) = \frac{3}{2}V_jP_j(0). \tag{11}$$

Формулы (8) и (10), как и (2), (11), записаны без слагаемых, определяющих энергию покоя фермионов.

Численные расчеты показывают, что термодинамические характеристики заряженных фермионов осциллируют в магнитном поле. Каждому значению n соответствуют два пика. Характеристики парамагнитного нейтронного газа осцилляций не имеют, т. к. движение нейтрона в магнитном поле не квантуется. В отличие от электронного газа химические потенциалы нуклонов при любых значениях магнитного поля меньше, чем без поля, а давления больше (за исключением области сверхсильных магнитных полей). Средние полные энергии всех ферми-газов меньше соответствующих величин в отсутствие поля.

В случае слабых магнитных полей ($x_j > 10$) для заряженных фермионов

$$R_{3/2}(x_q) \approx x_q^{3/2}\left(1 + \frac{3\sigma_q^2 - 1}{8x_q^2}\right), \qquad R_{5/2}(x_q) \approx x_q^{5/2}\left(1 + \frac{5(3\sigma_q^2 - 1)}{8x_q^2}\right), \tag{12}$$

$$\zeta_q(B) \approx \zeta_q(0)\cdot\left(1 - \frac{(3\sigma_q^2 - 1)\mu^2B^2}{12\zeta_q^2(0)}\right), \tag{13}$$

$$P_q(B) \approx P_q(0)\cdot\left(1 + \frac{5(3\sigma_q^2 - 1)\mu^2B^2}{12\zeta_q^2(0)}\right), \qquad E_q(B) \approx E_q(0)\cdot\left(1 - \frac{5(3\sigma_q^2 - 1)\mu^2B^2}{12\zeta_q^2(0)}\right), \tag{14}$$

для нейтронов

$$R_{3/2}(x_n) \approx x_n^{3/2}\left(1 + \frac{3\sigma_n^2}{8x_n^2}\right), \qquad R_{5/2}(x_q) \approx x_q^{5/2}\left(1 + \frac{15\sigma_n^2}{8x_n^2}\right), \tag{16}$$

$$\zeta_n(B) \approx \zeta_n(0)\cdot\left(1 - \frac{\sigma_n^2\mu^2B^2}{4\zeta_n^2(0)}\right), \tag{16}$$

$$P_n(B) \approx P_n(0)\cdot\left(1+\frac{5\sigma_n^2\mu^2B^2}{4\zeta_n^2(0)}\right), \ldots\ldots E_n(B) \approx E_n(0)\cdot\left(1-\frac{5\sigma_n^2\mu^2B^2}{4\zeta_n^2(0)}\right). \quad (17)$$

В слабых магнитных полях с ростом индукции B убывают величины $\zeta_j(B)$, $E_j(B)$ и возрастает $P_j(B)$, что вполне согласуется с теорией парамагнетизма Паули [4] (в слабых магнитных полях диамагнетизм Ландау не проявляется). Несложно убедиться, что при $B \to 0$ имеет место $\zeta_j(B) \to \zeta_j(0)$, $P_j(B) \to P_j(0)$, $E_j(B) \to E_j(0)$.

В квантовом пределе сверхсильных магнитных полей для заряженных фермионов $n = 0$, и магнитные моменты всех микрочастиц направлены по полю. Тогда

$$x_q \le 3-\sigma_q, \qquad R_a(x_q) = a\left(x_q - 1 + \sigma_q\right)^{a-1}, \quad (18)$$

и

$$\zeta_q(B) = \frac{\pi^4\hbar^6 n_q^2}{2m_q^3\mu^2B^2} + \left(1-\sigma_q\right)\mu B, \quad (19)$$

$$P_q(B) = \frac{\pi^4\hbar^6 n_q^3}{3m_q^3\mu^2B^2}, \qquad E_q(B) = \frac{\pi^4\hbar^6 N_q^3}{6m_q^3\mu^2B^2V_q^2} + \left(1-\sigma_q\right)N_q\mu B. \quad (20)$$

При этом нижняя граница сверхсильного магнитного поля для протонов и электронов одинакова:

$$B^{(p)} = B^{(e)} = \frac{\pi^{4/3}\hbar^2 n_p^{2/3}}{2^{2/3}m_p\mu_я} = 3{,}82\cdot10^{-7}n_p^{2/3} \text{ (Гс)}. \quad (21)$$

Для нейтронов поле сверхсильное, если $x_n \le \sigma_n$.

$$B \ge B^{(n)} = \frac{\pi^{4/3}\hbar^2 n_n^{2/3}}{2^{2/3}m_n\mu_я}\frac{18^{1/3}}{2\sigma_n} = 2{,}51\cdot10^{-7}n_n^{2/3} \text{ (Гс)}. \quad (22)$$

В этом случае

$$R_a(x_n) = \frac{1}{2}\left(x_n+\sigma_n\right)^a, \qquad \zeta_n(B) = 2^{2/3}\zeta_n(0) - \sigma_n\mu B, \quad (23)$$

$$P_n(B) = 2^{2/3}P_n(0), \qquad E_n(B) = 2^{2/3}E_n(0) - \sigma_n N_n\mu B. \quad (24)$$

Таким образом, химические потенциалы рассматриваемых ферми-газов при заданных их концентрациях уменьшаются с ростом индукции сверхсильного магнитного поля и достигают нуля при

$$B_q = \left(\frac{2}{3}\right)^{2/3}\frac{\zeta_q(0)}{\left(\sigma_q-1\right)^{1/3}\mu}, \qquad B_n = \frac{2^{2/3}\zeta_n(0)}{\sigma_n\mu} \quad (25)$$

для заряженных фермионов и нейтронов соответственно, а при более высоких значениях B (в соответствующих реальных условиях вряд ли достижимых) становятся отрицательными величинами. Давления протонного и электронного газов стремятся к нулю при $B \to \infty$. Давление нейтронного газа во всей области сверхсильных магнитных полей больше соответствующей величины в отсутствие поля в $2^{2/3}$ раза и не зависят от B,

что вполне согласуется с теорией парамагнетизма Паули: после ориентации магнитных моментов всех нейтронов по полю нет прироста кинетической энергии. Средние полные энергии всех трех газов в сверхсильном магнитном поле уменьшаются.

Учитывая, что спектр энергии свободного заряженного релятивистского фермиона в постоянном и однородном магнитном поле с индукцией B определяется выражением [2]

$$\varepsilon_q = \sqrt{c^2 p_z^2 + \left(\sqrt{m_q^2 c^4 + 2m_q c^2 \mu B\left(2n+1+2s\right)} + 2s\left(\sigma_q - 1\right)\mu B\right)^2}, \tag{26}$$

для большого термодинамического потенциала идеального ферми-газа получим:

$$\Omega_q\left(B\right) = -\frac{N_q}{2}\sqrt{\chi_q^2\left(0\right) - m_q^2 c^4}\,\frac{R_1}{R_2^{4/3}}, \tag{27}$$

Здесь

$$R_1 = \frac{3}{2}\sum_s\sum_n\left(\sqrt{X_q^2 + Y_q}\sqrt{X_q^2 - Z_q} - \frac{1}{2}\left(Y_q + Z_q\right)\ln\left|\frac{\sqrt{X_q^2 + Y_q} + \sqrt{X_q^2 - Z_q}}{\sqrt{X_q^2 + Y_q} - \sqrt{X_q^2 - Z_q}}\right|\right), \tag{28}$$

$$R_2 = \frac{3}{2}\sum_s\sum_n\sqrt{X_q^2 - Z_q}, \qquad X_q^2 = \frac{\chi_q^2\left(B\right) - m_q^2 c^4}{2m_q c^2 \mu B}, \qquad Y_q = \frac{m_q c^2}{2\mu B}, \tag{29}$$

$$Z_q = 2n + 1 + 2s + \frac{\left(\sigma_q - 1\right)^2}{4Y_q} + 2s\left(\sigma_q - 1\right)\sqrt{1 + \frac{2n+1+2s}{Y_q}}, \tag{30}$$

$$\chi_q^2\left(0\right) - m_q^2 c^4 = \left(3\pi^2\right)^{2/3} c^2 \hbar^2 n_q^{2/3}; \tag{31}$$

суммирование в (28) и (29) ведется до тех пор, пока $X_q^2 \geq Z_q$.

Для химического потенциала, давления и средней полной энергии соответственно получаем:

$$\chi_q\left(B\right) = \sqrt{m_q^2 c^4 + \left(\chi_q^2\left(0\right) - m_q^2 c^4\right)\frac{X_q^2}{R_2^{2/3}}}, \tag{32}$$

$$P_q\left(B\right) = \frac{N_q}{2V}\sqrt{\chi_q^2\left(0\right) - m_q^2 c^4}\,\frac{R_1}{R_2^{4/3}}, \qquad E_q\left(B\right) = \frac{N_q}{2}\sqrt{\chi_q^2\left(0\right) - m_q^2 c^4}\,\frac{2\sqrt{X_q^2 + Y_q}R_2 - R_1}{R_2^{4/3}}. \tag{33}$$

В квантовом пределе сверхсильных магнитных полей имеем:

$$X_q^2 \leq 2 + \frac{\left(\sigma_q - 1\right)^2}{4Y_q} - \left(\sigma_q - 1\right)\sqrt{1 + \frac{2}{Y_q}}, \qquad Z_q = \left(\sigma_q - 1\right)\cdot\left(\frac{\sigma_q - 1}{4Y_q} - 1\right). \tag{34}$$

Полученные формулы описывают свойства крайне вырожденного идеального релятивистского газа заряженных фермионов в магнитном поле, не оказывающем влияния на величины аномальных магнитных моментов микрочастиц. При $B > 10^{13}$ Гс мы вправе принять $\sigma_e \approx 1$, что не отразится существенно на численных расчетах термодинамических величин, но значительно их упростит. При этом

$$Z_e = 2n + 1 + 2s, \tag{35}$$

$$\varepsilon_e = \sqrt{c^2 p_z^2 + m_e^2 c^4 + 2 m_e c^2 \mu_B B (2n + 1 + 2s)}. \tag{36}$$

Формулы [5–7], описывающие термодинамические характеристики ультрарелятивистского электронного газа в квантующем магнитном поле, являются частным случаем полученных нами соотношений при $\sigma_e = 1$ и $\chi_e >> m_e c^2$.

Представим выражения для давления и плотности энергии крайне вырожденного идеального релятивистского электронного газа в квантующем магнитном поле с индукцией B в виде:

$$P_e(B) = \frac{n_e}{2} \xi_e(0) \frac{R_1(X_e, Y_e)}{R_2^{4/3}(X_e)}, \tag{37}$$

$$w_e(B) = \frac{n_e}{2} \xi_e(0) \frac{2\sqrt{X_e^2 + Y_e} R_2(X_e) - R_1(X_e, Y_e)}{R_2^{4/3}(X_e)}, \tag{38}$$

где

$$\xi_e(B) = \xi_e(0) \frac{X_e}{R_2^{1/3}(X_e)}, \qquad \xi_e(0) = (3\pi^2)^{1/3} c\hbar n_e^{1/3}, \tag{39}$$

$$X_e^2 = \frac{\chi_e^2(B) - m_e^2 c^4}{2 m_e c^2 \mu B}, \qquad Y_e = \frac{m_e c^2}{2\mu B}, \qquad R_2(X_e) = \frac{3}{2}\left(X_e + 2\sum_{n=1}^{l} \sqrt{X_e^2 - 2n} \right), \tag{40}$$

$$R_1(X_e, Y_e) = \frac{3}{2}\left(X_e \sqrt{X_e^2 + Y_e} - \frac{Y_e}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{X_e^2 + Y_e} + X_e}{\sqrt{X_e^2 + Y_e} - X_e} \right| + \right.$$

$$\left. + 2\sum_{n=1}^{l} \left(\sqrt{X_e^2 + Y_e} \sqrt{X_e^2 - 2n} - \frac{Y_e + 2n}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{X_e^2 + Y_e} + \sqrt{X_e^2 - 2n}}{\sqrt{X_e^2 + Y_e} - \sqrt{X_e^2 - 2n}} \right| \right) \right). \tag{41}$$

Суммирование в (40) и (41) ведется до тех пор, пока выражения под соответствующими радикалами неотрицательные.

В квантовом пределе сверхсильных магнитных полей

$$X_e^2 \le 2, \ldots R_1(X_e, Y_e) = \frac{3}{2}\left(X_e \sqrt{X_e^2 + Y_e} - \frac{Y_e}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{X_e^2 + Y_e} + X_e}{\sqrt{X_e^2 + Y_e} - X_e} \right| \right), \tag{42}$$

$$R_2(X_e) = \frac{3}{2} X_e, \qquad \xi_e(B) = \frac{\pi^2 \hbar^3 c n_e}{m_e \mu_B B}. \tag{43}$$

Для ультрарелятивистских электронов в квантующем магнитном поле $\xi_e >> m_e c^2$, $X_e^2 >> Y_e$; при этом в квантовом пределе сверхсильного магнитного поля $R_1(X_e) = 1{,}5 X_e^2$ и уравнение состояния

$$P_e(B) = w_e(B) = \frac{1}{2} n_e \cdot \xi_e(B). \tag{44}$$

В слабых магнитных полях ($X_e^2 > 10$) для ультрарелятивистских электронов:

$$R_2(X_e) \approx X_e^3\left(1+\frac{X_e^4}{4}\right), \qquad R_1(X_e) \approx \frac{1}{2}\left(X_e^4 + \ln X_e\right), \tag{45}$$

$$\frac{2R_1(X_e)}{R_2^{4/3}(X_e)} \approx \left(1+\frac{\ln X_e}{X_e^4}\right)\left(1-\frac{1}{3X_e^4}\right) \approx 1+\frac{1}{X_e^4}\left(\ln X_e - \frac{1}{3}\right). \tag{46}$$

На рисунке представлены логарифмические зависимости величин P_e / K от w_e / K в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле с индукцией 10^{14} Гс, превышающей квантовый предел для рассматриваемого диапазона значений плотности энергии.

Здесь $K = \dfrac{m_e^4 c^5}{32\pi^2\hbar^3}$. Область значений рассматриваемых величин соответствует именно релятивистскому электронному газу; влияние сверхсильного магнитного поля на уравнение состояния в нерелятивистском и ультрарелятивистском пределах вполне очевидно из аппроксимации графиков.

Рисунок. – Уравнение состояния крайне вырожденного идеального электронного газа

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румер, Ю. Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика / Ю. Б. Румер, М. Ш. Рывкин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1977. – 552 с.

2. Вонсовский, С. В. Магнетизм микрочастиц / С. В. Вонсовский. – М. : Наука, 1973. – 280 с.

3. Саакян, Г. С. Равновесные конфигурации вырожденных газовых масс / Г. С. Саакян. – М. : Наука, 1972. – 344 с.

4. Паули, В. Квантовые теории магнетизма. Магнитный электрон / В. Паули // Тр. по квантовой теории. – М. : Наука, 1977. – С. 34.

5. Шульман, Г. А. Холодная нейтральная плазма в квантующем магнитном поле / Г. А. Шульман // Изв. вузов. Физика. – 1974. – № 10. – С. 24–28.

6. Шульман, Г. А. Нейтронизация холодного водорода в присутствии сверхсильных магнитных полей / Г. А. Шульман // Астрофизика. – 1974. – Т. 10, вып. 4. – С. 543–554.

7. Шульман, Г. А. О свойствах холодного плотного вещества с вмороженным сверхсильным магнитным полем / Г. А. Шульман // Астрофизика. – 1975. – Т. 11, вып. 1. – С. 89–95.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 02.09.2019

Sekerzhitsky V. S. **On the Question of Equations State of Extremely Degenerate Ideal Fermi-Gases in Magnetic Field**

The equations of state extremely degenerate ideal fermi-gases in magnetic field i are formulated. The unrelativistic and ultrarelativistic approximations are consider. The maximum cases of low and super-strong magnetic fields are b formulated. Results find application by decision task theoretical astrophysics, that combine with researchs of physical properties superdense strong magnetized matter and modeling super-dense astrophysical objects.

UDK 628:502.1

M. M. Bohoslavets[1], L. I. Chelyadyn[2], M. I. Medvid[3]
[1]head of Environmental Protection Department of the Petrochemical of the Precarpathian region (Nadvirna, Ivano-Frankivsk region, Ukraine)
[2]Ph. D., Associate Professor, Professor of Chemistry of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)
[3]assistant, Department of General Geology, Engineering Geology and Hydrogeology of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)
e-mail: chelyadyn@ukr.net[2]

PHYSICAL, ELECTRICAL AND CHEMICAL ASPECTS OF TECHNOLOGY OF INFILTRATES TREATMENT OF DOMESTIC WASTE LANDFILLS

Environmental protection of territories of landfills includes filtrates treatment, that occur in the body of a landfill and are extremely toxic, as they have harmful effect on flora, fauna and people and that's why this problem is so important. Almost all ingredients of filtrates of solid domestic waste (SDW) dumps exceed limiting quality criterions (LQC), though the most dangerous for water resources is concentration of ammonium nitrogen, nitrates and organic compounds, which have the greatest influence on DOCO index. For filtrates treatment of SDW dump the technology of reverse osmosis is mostly used and the article highlights electrical, chemical and sorption technology. Results of investigation of filtrates treatment by such technology indicate its perspectives as it has been got decrease of DOCO index up to 334,3 mg/dm^3 and ammonium nitrogen – 36,0 mg/dm^3, and also by other indices, for example nitrates – 6,8 mg/dm^3. As a result it became possible to achieve decrease of DOCO almost twice and decrease of concentration of ammonium ions more than three times.

Introduction

Water resources are mainly polluted by sewage, filtrates from different sites [1] which contain harmful components. So this problem is of extremely great importance for society, as far as environmental safety is decreased as a result of polluted environments that get into hydrosphere.

An ecological problem appears on the territories of domestic waste damps due to their accumulation, as far as they influence three main factors of the landfill environmental safety, namely pollute the atmosphere, water resources by filtrates, and also soil.

Since such sites are mainly located outside big cities, districts or villages, where there are no effective purifying structures, sewage treatment of refuse landfills is a great problem.

Table 1 contains indices of sewage (filtrates) of two enterprises of the Precarpathian region and limiting quality criterions (LQC) in Ukraine [2] for waste into water resources.

The filtrates of these sites include different types of contaminations (mechanical, chemical, biological), which require specific technology of water treatment, as far as composition of filtrates according to indices of ingredients is different (table 1), namely: concentration of one contaminating component can exceed several times allowed values for waste into water resources, for example for an infiltrate of a landfill IF according to DOCO index in comparison with LQC it's 7 times as big and for a landfill L it's 15 times as big.

The analysis of data in table 1 indicates the fact that filtrate L of a SDW landfill is characterized by high concentration of organic substances – more than 12,8 g/dm^3, and inorganic component is prevailed by sodium chloride, that is equal to almost 75 % from the sum of dissolved mineral salts. High values of a filtrate's COI indicate that by chemical composition filtrate has great concentration of high-density metals, caused by metal-containing substances, present in SDW, that can corrode and form complex compounds with organic ligands – products of biological and chemical decomposition of organic substances. Such

average chemical composition of filtrates with slight differences, depending on local conditions of accumulation territories, is characteristic for all SDW damps in Ukraine.

Table 1. – Indices of landfills filtrates and limiting demands

p/ch	Quality index, concentration, mg/dm^3	Filtrate IF	Filtrate L	LQC
1	Smell, points	3	5	2–3
2	Transparency, cm	3	4	10–20
3	Water index pH	8,4	8	6,5–9
4	BSK_5, mgO_2/dm^3	2 280,0	952,0	325
5	Chlorides	1 747,4	4 751,0	350
6	Nitrogen ammonium and ammonia	36,0	324,0	30
7	Nitrates	92,3	9,56	45
8	Nitrites	5,25	0,58	3,3
9	Iron (general)	94,4	77,0	2,5
10	Copper	25,9	77,0	0,5
11	Lead	0,5	1,0	0,1
12	Petroleum products	7,6	77,0	10
13	SPAR	8,82	0,32	25
14	Stuck substances	472,0	362,6	380
15	Dry remains (90 ºC)	15 010	28 300,0	1 000
16	COI	5 750	12 630	810

In filtrates of SDW damps almost all ingredients exceed LQC, though the most dangerous for water resources is concentration of ammonium nitrogen, nitrates and organic compounds that influence the most COI index.

Environmental protection of landfills territories and also water resources that are situated outside landfills from filtrates contaminations is an extremely important problem as it influences people, flora, and fauna.

Industrial enterprises and public utilities mostly use oxidation treatment (OT) of sewage [3] which occupy great territories and the process of treatment requires abidance by certain parameters (temperature not lower than 10 ºC, bacteria nutriment, great amount of dispersive air, and so forth), and treatment efficiency is by index, for example COI, not more than 70–85 %.

Foreign publications contain different technologies for SDW filtrates treatment, collected by SDW drain systems, but the most widely used one is the technology of reverse osmosis [4], applied for filtrates treatment of landfills in many foreign countries. The technology makes it possible to achieve great treatment efficiency, that allows forcing the purified filtrate to surface basins, and the concentrated product that occupies near 10–20 % goes back to the body of a damp. The main disadvantages of the technology include a great cost of capital expenses for unit production and putting into operation and operation costs for ensuring the operation.

Filtrate treatment with the help of electrical and plasma treatment [5] is a perspective technology which is characterized both by cost of implementation and quality of treatment as a winning one. As a result of technological difficulties it hasn't got wide industrial application. Thermal technologies of filtrate treatment (evaporation and drying) are connected with evaporation of great amount of water, that requires considerable expenditures of energy, and also partially cause atmosphere pollution.

The usage of sorption technologies for filtrates treatment from heavy metals with application of natural adsorbents or sorbents made of raw materials of vegetable waste is described in [6].

The authors [7] introduce the technology of anaerobic treatment of filtrates by the method of successive treatment in anaerobic reactor UASB and anaerobic stage which is accompanied by receipt of biogas. A great disadvantage of anaerobic process is sensitivity to temperature and pH changes, and also to different toxic substances that are contained in filtrates. Evaluation of implementation of different ways of anaerobic and aerobic technologies is given in [8].

However, application of this technology did not succeed in Ukraine, that is due to cost and different composition of filtrates, which occur on our SDW landfills, so further on study of technologies of filtrates treatment with the help of physical and chemical method is given.

Sewage treatment by physical and chemical method in comparison with sewage oxidation treatment (OT) is conducted by technology that includes local treatment units, which operate by physical, electrical and chemical technology [9]. Such technologies are more effective and give an opportunity of sewage treatment to desired efficiency by some indices. Perspectives of this method of SDW landfills treatment is shown by a number of advantages in comparison with anaerobic systems. These advantages include: low cost of purifying structures construction, flexibility of operation, ability to change quickly mode of treatment, easy starting of unit operation, simplicity of maintenance and convenience of automation.

The approval of SDW damp filtrates treatment by electric, chemical and sorption method is given in [10] and it shows that decrease in COI is considerable but not sufficient for their dropping in all types of water resources, for example fishing and household resources.

The aim of this paper is working out a new complex electric, chemical and sorption technology of IF landfill filtrate treatment on the basis of new devices, natural sorbents and optimal parameters of water treatment technology.

Methodology of study and content

The main stages of a complex electric, chemical and sorption technology are as follows.

The first stage includes electric treatment of sewage in the first electric device, where oxidation and resumption of harmful components of sewage take place. Reactions have several stages: transfer of molecules of organic substance to anions, formation of atomic hydrogen, chemical resumption of organic substances and formation of fine-dispersed H_2 and O_2:

$$R + \hat{e} \rightarrow R^-;\ \ 2H^+ + 2\hat{e} \rightarrow H_2;\quad R^- + H^+ \rightarrow RH,$$
$$2R + H_2 \rightarrow 2RH,\quad R + H^+ + \hat{e} \rightarrow RH.$$

The second stage of sewage treatment takes place in th/ls, where depending of quantity of mechanic stuck fallouts and formed as a result of electrical treatment contaminations, at the entrance of the settler by changing the slope of inclined planes higher sewage treatment efficiency takes place due to flotation by fine-dispersed H_2 light and heavy contaminations on inclined planes in a thin-layer settler (th/ls).

The third stage of treatment is sewage retreatment after th/ls in electrical device II, as far as by electrical treatment takes place the process of synthesis of «available chlorine». Chlorine, that gives off, dissolves along with formation of hydrochloric and perchloric acid and further on of hypochlorite:

$$Cl_2 + H_2O \leftrightarrow HClO + HCl, \qquad HClO + HCl + 2OH^- \leftrightarrow H_2O + Cl^- + ClO,$$

which influence electrical and chemical destruction of organic compounds and decrease of their toxicity at the third stage. The fourth stage includes the method of filtration and sorption of sewage treatment in designed automatic filters-adsorbers, which are filled with natural sorbent – zeolite and clynoptiolite of different fractional composition.

Physical and chemical indices of a real filtrate of SDW landfill IF at the average within the fourth quarter of 2017 are as follows: pH 7; COI 934,3 mgO_2/dm^3; nitrogen ammonium 36,0 mg/dm^3, nitrites 6,8 mg/dm^3; chlorides 372,6 mg/dm^3; sulfates 808,6 mg/dm^3.

Different samples of zeolite and clynoptiolite from Sokyrnyky field [11] were used for filtrating loads of a filter, which is characterized by the following average indices: for a fraction 0,5–3 mm, bulk density – 1,1–1,18 kg/dm^3, specific surface – 20,1–40, 8 m^2/g, size of pores 3,5–4,2 A.

For sewage treatment we studied the technology of physical and chemical treatment with the help of electric treatment method and filtration through sorption material on a unit, which consists of a container for sewage, centrifugal pump, electric devices, thin-layer settler (th/ls) [12] with a capability of inclined planes installation, rectifier, camera for accumulation of water treatment mud, filters-adsorbers, container for purified water collection. Electrical and chemical processes that cause floatation of stuck fallouts including on petroleum products in a thin-layer settler and influence the destruction of soluble contaminations take place in sewers. Sewage treatment was conducted according to the following technology under dynamic conditions in such a way is shown in the picture.

Picture. – Scheme of a laboratory unit for sewers treatment

Sewage from the container was forced by a pump during half an hour in a quantity of 40 dm^3 through the electrical device.

Under the influence of direct current (U = 12–24–36 B, I = 1,0–10 A) concentration of ingredients in sewage was determined on different stages before and after treatment in a certain technological apparatus with application of techniques [13–15] and treatment efficiency α, % for certain ingredients after a settler or filter was determined.

One of the indices of water contamination often used is COI, which is a generalized index for contaminations (organic and inorganic), and therefore this index was determined before and after treatment.

Results and discussion

The results of the study with the usage of real sewage are given in the table 2.

Table 2. – Results of filtrate treatment with the help of electrical and chemical technology

Number of a sample	Before treatment			Parameters of technology			After treatment			
	Stuck fallouts, mg/dm^3	ammonium, mg/dm^3	COI, mgO^2/dm^3	Tension I electrical device, V	Tension II electrical device, V	Expense, dm^3/h	Stuck fallouts, mg/dm^3	ammonium, mg/dm^3	COI, mgO^2/dm^3	Treatment efficiency α, (COI)%
1	12,6	8,7	685,09	36	12	6	3,0	2,0	74,61	89,1
2	11,4	23,7	772,56	36	12	6	6,1	1,5	93,86	87,9
5	15,5	15,3	655,54	36	12	8	3,2	1,4	58,14	91,1
7	19,8	22,4	781,52	36	24	8	2,3	1,2	50,16	93,6
9	15,4	18,3	617,85	24	24	8	3,2	0,8	37,42	93,9
1	12,6	48,7	685,09	24	24	8	3,3	3,7	29,34	95,7
2	11,4	23,7	772,56	24	36	10	3,7	2,0	62,38	91,9
5	45,5	15,3	655,54	12	36	10	3,5	1,8	43,82	93,3
7	49,8	22,4	781,52	12	36	10	3,6	1,3	55,65	92,8
9	75,4	18,3	617,85	12	36	12	4,5	0,9	50,34	91,8

At the last stage sewage got for further treatment with the help of filtration by loading into two parallel filters.

Samples of sewage were taken from container 1 and after a settler and were determined change of p/p concentration, stuck fallouts and other indices, comparing them with the initial ones, determining the degree of their decrease.

The study has shown that filtrate treatment of SDW landfills in cylindrical electrical devices increases treatment efficiency from contaminations in a thin-layer settler for 16–25 %.

Optimal parameters of electrical and chemical treatment technology implementation are the following: expense 8 dm^3/h and 24 v on electrical device I and device II.

The suggested parameters of physical, electrical and chemical technology give an opportunity to treat effectively sewage, as far as electrical treatment before the settler causes floatation of stuck fallouts and p/p to the upper part of a thin-layer settler by gases of electrolysis.

For increasing filtrates treatment efficiency from soluble contaminations investigation of their adsorption by different fractions of zeoliolite and clynoptyolite with the help of filtration method was conducted and the results are given in the table 3.

Table 3. – Indices of filtrate treatment with the help of electrical, chemical and sorption technology

Number of a sample/filter	Before treatment			After treatment			Treatment efficiency α, %		
	Stuck fallouts, mg/dm^3	Ammonium, mg/dm^3	COI, mgO^2/dm^3	Stuck fallouts, mg/dm^3	Ammonium, mg/dm^3	COI, mgO^2/dm	Stuck fallouts	ammonium	COI
1/**I**	32,6	48,7	685,09	3,0	2,0	52,15	90,8	95,9	92,4
3	91,4	23,7	772,56	6,1	1,5	43,86	93,3	93,6	94,3
6	45,5	15,3	655,54	3,2	1,4	38,14	93,7	90,8	94,1
8	49,8	22,4	781,52	2,3	1,2	50,16	95,4	94,6	93,6
10	75,4	18,3	617,85	3,2	0,8	47,42	95,7	95,6	92,3
1/**II**	32,6	48,7	685,09	3,3	3,7	46,50	89,9	92,4	93,2
3	91,4	23,7	772,56	1,6	2,0	62,38	98,2	91,6	91,9
6	45,5	15,3	655,54	3,5	1,8	32,12	92,3	88,2	95,1
8	49,8	22,4	781,52	3,6	1,3	51,34	92,7	94,2	93,4
10	75,4	18,3	617,85	4,5	0,9	49,65	94,0	95,1	91,9

Note – I – filter with a fraction 1–3 mm of a zeolite, II – filter with a fraction 0,5–1 mm

Suggested physical, electrical, chemical and sorption technology gives an opportunity to treat sewage effectively, as far as electrical treatment before settler cause destruction of soluble contaminations and further flotation of stuck fallouts and p/p to the upper part of a thin-layer settler by gases of electrolysis and zeolite absorbs residual soluble and nonsoluble contaminations, that were not separated in a settler.

Conclusions

The study of filtrate treatment indicates that conduction of filtrate treatment by electrical, chemical and sorption technology increases its treatment efficiency from up to 89,9–98,2 %, ammonium nitrogen to 89,9–98,2 % and filtration by zeolite clynoptilolite increases it more 2÷4 %, that is proved by index COI, that is equal to 91,9–95,1 %, since concentration of organic and inorganic contaminations decreases.

BIDLIOGRAPHY

1. Рудько, Г. І. Стратегічна екологічна оцінка та прогноз стану довкілля західного регіону України : у 2 т. / Г. І. Рудько ; за ред. Г. І. Рудька, О. М. Адаменко. – Київ ; Чернівці : Букрек, 2017. – Т. 1. – 471 с.

2. ДБН В.2.4-2-2005. п. 3.110, п. 3.113. Полігони твердих побутових відходів.

3. Tchobanoglous, G. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse Hardcover / G. Tchobanoglous, F. L. Burton, H. D. Stensel. – McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2002. – 1848 p.

4. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review / E. Gomez [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – № 161. – P. 614–626.

5. Landfill leachate treatment using plasma-Fenton's process / A. Mashal [et al.] // Sixth Jordan International Chemical Engineering Conference. – 2012. – P. 256–259.

6. Edwards, J. D. Industrial Wastewater Treatment a guidebook / J. D. Edwards // CRC Press Boca Raton Fla. – 1995. – P. 1–192.

7. Combination of ion exchange and partial nitritation. Anammox process for ammonium removal from mainstream municipal wastewater / A. Malovanyy [et al.] // Water Science & Technology. – 2014. – Vol. 70, № 1. – P. 144–151.

8. Аналіз перспектив аеробного очищення інфільтратів сміттєзвалищ та полігонів твердих відходів / О. І. Мороз [та ін.] // Наук. вісн. Нац. лісотехн. ун-ту України. – 2017. – Вип. 27 (3). – С. 83–88.

9. Chelyadyn, V. L. Processing Technologies of Technogenic Waste into Filter Media for Sewage Treatment Of Industrial Objects / V. L. Chelyadyn, L. I. Chelyadyn // Water Supply and Wastewater Removal : monografie / ed. by Henryk Sobczuk, Beata Kowalska. – Lublin, 2016. – P. 15–25.

10. Челядин, Л. І. Екотехнології промислових об’єктів регіону : монографія / Л. І. Челядин. – Івано-Франківськ, 2018. – С. 116–207.

11. Природные цеолиты / Г. В. Цицишвили [и др.]. – М., 1985. – С. 108.

12. Тонкошаровий відстійник для очистки вод : пат. UA 5740, МПК B 01 D 25/00 / Л. І. Челядин, М. В. Лігоцький, В. Л. Челядин, Б. Й. Ружицький. – Опубл. 15.03.2005.

13. Лурье, Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод / Ю. Ю. Лурье. – М., 1984. – 448 с.

14. Методика фотометричного визначення амоній іонів з реактивом Неслера в стічних водах : КНД 211.1.4.030-95. – Київ, 1995. – 16 с.

15. Якість води. Визначання хімічної потреби в кисні (ISO 6060:1989, IDT): ДСТУ ISO 6060:2003. – [Чинний від 2003.10.06]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. – 6 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 09.02.2019

Богославец Н. М., Челядын Л. И., Медвидь М. И. **Физико-электрохимические аспекты технологии очистки инфильтрата полигона бытовых отходов**

Защита окружающей среды территорий полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) от загрязнения включает и очистку инфильтратов. В инфильтратах свалок ТБО почти все ингредиенты превышают гигиенический норматив, однако наиболее опасным для водных ресурсов является содержание аммонийного азота, нитратов и органических соединений. Проведены исследования электросорбционной технологии очистки фильтрата свалок твердых бытовых отходов. Статический и динамический режим реализации обеих стадий технологии исследованы на модельных установках. Результаты исследований по очистке фильтрата по такой технологии указывают на ее перспективность, поскольку получено уменьшение показателя химического потребления кислорода в 334,3 мг/дм^3 и азота аммонийного – 36,0 мг/дм^3, а также по другим показателям, например, по нитритам – 6,8 мг/дм^3. В результате удалось добиться уменьшения химического потребления кислорода почти в два раза и снижения концентрации ионов аммония более чем в три раза.

УДК 544.11

Н. С. Ступень
канд. техн. наук, доц., доц. каф. химии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: chemskorp@yandex.ru

РАЗВИТИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрены основные этапы и перспективы развития периодической таблицы химических элементов и синтеза новых элементов.

По-видимости, периодическому закону
будущее не грозит разрушением, а только
надстройки и развитие обещает...
Д. И. Менделеев

150 лет назад, в 1869 г., Д. И. Менделеев составил первый вариант своей таблицы химических элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве, и назвал ее «Опыт системы элементов». 2019 г. Генеральной ассамблеей ООН провозглашен Международным годом Периодической таблицы химических элементов. Это масштабное событие посвящено 150-летию открытия Периодического закона химических элементов великим русским ученым Д. И. Менделеевым.

С инициативой о проведении Международного года Периодической таблицы химических элементов выступили Российская академия наук, Российское химическое общество имени Д. И. Менделеева, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, российские и зарубежные ученые. Инициативу России поддержали зарубежные страны, международные научные организации, а также более 80 национальных академий наук и научных обществ. Среди них Международный Союз по теоретической и прикладной химии (IUPAC), Международный союз теоретической и прикладной физики (IUPAP), Европейская Ассоциация химических и молекулярных наук (EuCheMS) и др.

Открытие Периодического закона и создание таблицы элементов – это действительно колоссальное научное достижение, заложившее основу современной химии и ядерной физики, позволившее четко систематизировать представления о природе и взаимодействии веществ. Первым исследователем, положившим в основу классификации научную идею о связи химических свойств элементов с их атомной массой, был немецкий ученый Иоганн Вольфгант Дёберейнер. В 1817 г. И. Дёберейнер обнаружил, что некоторые элементы, обладавшие общностью химических свойств, можно расположить по возрастанию их атомных масс так, что атомная масса среднего из трех элементов окажется равной примерно среднему арифметическому из суммы атомных масс соседних элементов (правило триад). Он назвал такие семейства элементов триадами. И. Дёберейнер составил из известных в то время элементов четыре триады: литий (Li) – натрий (Na) – калий (K); кальций (Ca) – стронций (Sr) – барий (Ba); сера (S_ – селен (Se) – теллур (Te); хлор (Cl) – бром (Br) – иод (I) [1].

В 1843 г. Леопольд Гмелин опубликовал таблицу химических элементов, расставленных по группам в порядке возрастания «соединительных масс». Вверху таблицы Л. Гмелин поместил три «базисных» элемента: кислород, азот и водород. Под этими

элементами ученый расположил триады, тетрады и пентады химических элементов (рисунок 1).

Рисунок 1. – Таблица химических элементов Л. Гмелина (1843)

В 1850 г. немецкий ученый Макс фон Петтенкофер предложил найти у элементов соотношения, подобные тем, что обнаруживаются в гомологических рядах, т. е. в рядах соединений, отличающихся друг от друга на гомологическую разницу CH_2. Он указал, что атомные веса некоторых элементов отличаются друг от друга на величину, кратную восьми. На этом основании М. Петтенкофер высказал предположение, что элементы являются сложными образованиями каких-либо субэлементарных частиц. Такого же мнения придерживался французский химик Ж. Дюма [2].

1859 г. немецкий ученый А. Штреккер опубликовал работу «Теория и практика определения атомных весов», в которой детально разработал дифференциальную систему химических элементов, описывающую закономерности в изменении их атомных масс. Отмеченные А. Штреккером закономерности в изменении атомных масс стали важной предпосылкой для создания периодической системы химических элементов (рисунок 2).

Рисунок 2. – Таблица элементов А. Штреккера (1859 г.)

Новую попытку расположить химические элементы в определенной последовательности изложил в 1862 г. французский ученый Александр Эмиль Бегуйе де Шанкуртуа. Он связал свойства элементов с функцией чисел и расположил все вокруг цилиндра по спирали. Соответственно, его таблица получила название «Земная спираль». А. Шанкуртуа нанес на боковую поверхность цилиндра, размеченную на 16 частей, линию под углом 45°, на которой поместил точки, соответствующие атомным массам элементов. Таким образом, элементы, атомные веса которых отличались на 16,

или на число, кратное 16, располагались на одной вертикальной линии. При этом точки, отвечающие сходным по свойствам элементам, часто оказываются на одной вертикальной линии. Так, на одну вертикаль попадали литий, натрий, калий; бериллий, магний, кальций; кислород, сера, селен, теллур и т. д. [1]. Однако А. Шанкуртуа не смог теоретически объяснить построение своей системы. Это явилось основной причиной того, что его работа осталась практически незамеченной. Недостатком спирали французского ученого было то, что на одной линии с близкими по своей химической природе элементами оказывались также и элементы с совсем иными свойствами. В группу щелочных металлов попадал марганец, а в группу кислорода и серы – ничего общего с ними не имеющий титан (рисунок 3).

Рисунок 3. – Спиральная модель таблицы А. Шанкуртуа (1862 г.)

А. Шанкуртуа был одним из первых ученых, отметивших периодичность свойств элементов; его винтовой график действительно фиксирует закономерные отношения между атомными массами элементов [1]. Но установив некоторые соотношения между атомными массами элементов и их физико-химическими свойствами, А. Шанкуртуа не смог на основе своей «винтовой линии» подняться до закономерного обобщения – открытия Периодического закона. Руководствуясь «винтовой линией», оказалось невозможным рассчитать атомные массы неизвестных к тому времени элементов, существование которых уже можно было предположить [2; 3].

В 1864 г. Джон Ньюлендс опубликовал таблицу химических элементов, отражающую так называемый «закон октав». Ученый считал, что в ряду элементов, расположенных в порядке возрастания их атомных весов, свойства восьмого элемента сходны со свойствами первого. Например, такой октавой был ряд элементов: H (до), Li (ре), Be (ми), B (фа), C (соль), N (ля), O (си) [3]. Действительно, такая зависимость верна,

но только для легких элементов. В таблице Дж. Ньюлендса сходные элементы располагались в горизонтальных рядах, однако в одном и том же ряду часто оказывались и элементы совершенно непохожие. Кроме этого, в некоторых клетках ученый разместил по два элемента, также не оставил пустых клеток для неоткрытых еще элементов (рисунок 4).

	№		№		№		№		№		№		№		№
H	1	F	8	Cl	15	Co Ni	22	Br	29	Pd	36	I	43	Pt Ir	50
Li	2	Na	9	K	16	Cu	23	Rb	30	Ag	37	Cs	44	Tl	51
Be	3	Mg	10	Ca	17	Zn	24	Sr	31	Cd	38	Ba V	45	Pb	52
B	4	Al	11	Cr	18	Y	25	Ce La	32	U	39	Ta	46	Tl	53
C	5	Si	12	Ti	19	In	26	Zr	33	Sn	40	W	47	Hg	54
N	6	P	13	Mn	20	As	27	Di Mo	34	Sb	41	Nb	48	Bi	55
O	7	S	14	Fe	21	Se	28	Rh Ru	35	Te	42	Au	49	Th	56

Рисунок 4. – Таблица химических элементов Дж. Ньюленса (1864)

Практически одновременно с работами Дж. Ньюлендса были опубликованы таблицы Уильма Одлинга. Еще в 1857 г. У. Одлинг составил таблицу, в которой 49 элементов были размещены в девяти группах. Спустя четыре года эта классификация была несколько усовершенствована ее автором. Все элементы, сходные по своим физико-химическим свойствам, У. Одлинг объединил в триады, тетрады и пентады. За пределами этих объединений остались водород, бор и олово [3]. В 1868 г. У. Олдинг опубликовал таблицу элементов, которая, на первый взгляд, демонстрировала закономерную взаимосвязь между всеми химическими элементами. Однако детальный анализ представленных данных позволял обнаружить явные несообразности, обесценивавшие значение таблицы: во-первых, в таблице фигурировали всего 45 элементов из 62 известных к тому времени, а во-вторых, в данных У. Одлинга присутствовали необоснованные изъятия. Например, имелись обозначения: «Mn и прочие». В этом случае под «прочими» английский ученый подразумевал железо, кобальт, никель и медь (рисунок 5).

	Триплетные группы			
H 1			Mo 96	W 184
				Au 196.5
			Pd 106.5	Pt 197
Li 7	Na 23	-	Ag 108	
G 9	Mg 24	Zn 65	Cd 112	Hg 200
B 11	Al 27.5	-	-	Tl 203
C 12	Si 28	-	Sn 118	Pb 207
N 14	P 31	As 75	Sb 122	Bi 210
O 16	S 32	Se 79.5	Te 129	
F 19	Cl 35	Br 80	I 127	
	K 39	Rb 85	Cs 133	
	Ca 40	Sr 87.5	Ba 137	
	Ti 40	Zr 89.5	-	Th 231
	Cr 52.5		V 138	
	Mn 55 и др. (Fe,Ni,Co,Cu)			

Рисунок 5. – Таблица химических элементов У. Олдинга (1868)

Среди других исследователей, занимавшихся в 60-х гг. XIX в. сопоставлением атомных масс химических элементов с учетом их физико-химических свойств, весьма важное место занимал немецкий ученый Юлиус Лотар Мейер. В 1864 г. он опубликовал книгу «Современные теории химии и их значение для химической статики», впоследствии переведенную на русский язык. В этой книге содержалась таблица, в которой 44 химических элемента (из 63 известных к тому времени) были размещены в 6 столбцах в соответствии с их высшей валентностью (рисунок 6).

	4 werthig	3 werthig	2 werthig	1 werthig	1 werthig	2 werthig
	--	--	--	--	Li = 7.03	(Be = 9.3?)
Differenz =	--	--	--	--	16.02	(14.7)
	C = 12.0	N = 14.04	O = 16.00	Fl = 19.0	Na = 23.05	Mg = 24.0
Differenz =	16.5	16.96	16.07	16.46	16.08	16.0
	Si = 28.5	P = 31.0	S = 32.07	Cl = 35.46	K = 39.13	Ca = 40.0
Differenz =	$\frac{89.1}{2}$ = 44.55	44.0	46.7	44.51	46.3	47.6
	--	As = 75.0	Se = 78.8	Br = 79.97	Rb = 85.4	Sr = 87.6
Differenz =	$\frac{89.1}{2}$ = 44.55	45.6	49.5	46.8	47.6	49.5
	Sn = 117.6	Sb = 120.6	Te = 128.3	I = 126.8	Cs = 133.0	Ba = 137.1
Differenz =	89.4 = 2 x 44.7	87.4 = 2 x 43.7	--	--	(71 = 2 x 35.5)	--
	Pb = 207.0	Bi = 208.0	--	--	(Tl = 204?)	--

Рисунок 6. – Таблица Ю. Мейера (1864 г., фрагмент)

Следующую таблицу Ю. Мейер предложил в вышедшей в 1870 г. статье, которая содержала также график зависимости атомного объема элемента от атомного веса, имеющий характерный пилообразный вид. Таблица «Природа элементов как функция их атомного веса» состояла из девяти вертикальных столбцов, сходные элементы располагались в горизонтальных рядах; некоторые ячейки таблицы Ю. Мейер оставил незаполненными (рисунок 7).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	B = 11.0	Al = 27.3	–	–	–	?In = 113.4	–	Tl = 202.7
	C = 11.97	Si = 28		–		Sn = 117.8	–	Pb = 206.4
			Ti = 48		Zr = 89.7			
	N = 14.01	P = 30.9		As = 74.9		Sb = 112.2		Bi = 207.5
			V = 51.2		Nb = 93.7		Ta = 182.2	
	O = 15.96	S = 31.98		Se = 78		Te = 128?		–
			Cr = 52.4		Mo = 95.6		W = 183.5	
	F = 19.1	Cl = 35.38		Br = 79.75		J = 126.5		–
			Mn = 54.8		Ru = 103.5		Os = 198.6?	
			Fe = 55.9		Rh = 104.1		Ir = 196.7	
			Co = Ni = 58.6		Pd = 106.2		Pt = 196.7	
Li = 7.01	Na = 22.99	K = 39.04		Rb = 85.2		Cs = 132.7		–
			Cu = 63.3		Ag = 107.7		Au = 196.2	
?Be = 9.3	Mg = 23.9	Ca = 39.9		Sr = 87.0		Ba = 136.8		–
			Zn = 64.9		Cd = 111.6		Hg = 199.8	

Differenz von I zu II und von II zu III ungefähr = 16
Differenz von III zu V, IV zu VI, V zu VII schwankend um 46
Differenz von VI zu VIII, von VII zu IX bis 92

Рисунок 7. – Таблица Л. Мейера (1870 г., фрагмент)

В отличие от своих научных предшественников Д. И. Менделеев за основу взял не одну только атомную массу элементов, но и результаты применения «метода атомной аналогии» (рисунок 8).

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ

			Ti = 50	Zr = 90		? = 180.
			V = 51	Nb = 94		Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96		W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4		Pt = 197,4.
			Fe = 56	Rn = 104,4		Ir = 198.
			Ni = Co = 59	Pl = 106,6		Os = 199.
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108		Hg = 200
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116		Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118		
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122		Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127		
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133		Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137		Pb = 207
		? = 45	Ce = 92			
		?Er = 56	La = 94			
		?Yt = 60	Di = 95			
		?In = 75,6	Th = 118?			

Д.Менделеевъ.

Рисунок 8. – Первый вариант
Таблицы Д. И. Менделеева (1869 г.)

Д. И. Менделеев предсказывал свойства еще не открытых элементов, оставляя пустые ячейки в Периодической таблице, прогнозируя открытия соответствующих элементов. В историческом аспекте его прогнозы довольно быстро полностью подтвердилось. И эти исторические события ярко и отчетливо демонстрируют гениальность Д. И. Менделеева. Периодический закон позволил Д. И. Менделееву, оперировавшему 63 известными тогда элементами, шаг за шагом исправить атомные веса 11 из них. Далее, уже в 1875 г., французский химик П. Лекок де Буабодран открыл галлий, который оказался предсказанным Д. И. Менделеевым «экаалюминием». В 1879 г. Л. Нильсон открыл новый элемент – скандий, который оказался предсказанным Дмитрием Ивановичем «экабором». В 1885 г. К. Винклер открыл новый элемент германий, который оказался предсказанным «экасилицием». Из 29 предсказанных элементов Менделеев с удивительной точностью описал 12. При этом подробности свойств относились не только к простым веществам, но и к их соединениям. Открытие новых химических элементов позволило в свое время Д. И. Менделееву защитить право на открытие Периодического закона, поскольку этими открытиями подтвердились его предсказания [4].

В начале XX в. Периодическая система элементов неоднократно видоизменялась для приведения в соответствие с новейшими научными данными. В 1900 г. Дмитрий Менделеев и Уильям Рамзай, открывший инертные газы, пришли к выводу о необходимости включения в периодическую систему элементов особой, нулевой группы. В 1906 г. Д. И. Менделеев составил новый, подлинный вариант Периодической системы с учетом

поправок и внес не только нулевую группу инертных элементов, но и предсказанный им элемент эфира ньютоний и элемент короний как аналог аргону, но не имеющий массы. Детальная разработка «химической концепции мирового эфира» началась с открытия инертных газов (рисунок 9) [4].

Рисунок 9. – Периодическая таблица Д. И. Менделеева (1906)

Благодаря открытию сложного строения атома, радиоактивности, развитию квантовой механики Периодический закон получил квантово-механическое обоснование и начался синтез искусственных элементов. Таблица элементов, найденных в природе, кончается 92-м элементом ураном (U). Открытый в 1940 г. нептуний (Np, Z = 93) был первым искусственно полученным трансурановым элементом.

В 30-х гг. XX в. велись интенсивные исследования искусственных радиоактивных веществ, в частности продуктов бомбардировки нейтронами урана. Химический анализ этих продуктов приводил к выводу о существовании элементов тяжелее урана. В 1939 г. Мак-Миллан в продуктах облучения урана нейтронами открыл радиоактивный изотоп с периодом полураспада 2,3 суток. Затем изотоп исследовали итальянские ученые Э. Сегрэ и К. Перрье, которые установили, что его свойства подобны свойствам редкоземельных элементов. В мае 1940 г. Мак-Миллан и Абельсон изучили реакцию образо-

вания изотопа: уран-238 путем захвата нейтрона превращается в уран-239 (период полураспада 23 мин.), который в свою очередь превращается в нептуний-239. Название «нептуний» дано новому элементу потому, что он следует за ураном в соответствии с расположением планет в Солнечной системе [5]. В 1942 г. был открыт другой изотоп – нептуний-237 (Глен Теодор Сиборг), распадающийся с alfa-излучением (период полураспада 2,25 млн лет. Плутоний (Pu, № 94) – первый искусственный элемент, полученный в доступных для взвешивания количествах (1942 г.). В дальнейшем под руководством Сиборга были синтезированы америций (№ 95) (1944–1945), кюрий (№ 96) (1944), берклий (№ 97) (1949), калифорний (№ 98) (1950), эйнштейний (№ 99) (1952), фермий (№ 100) (1953), менделевий (№ 101) (1955), нобелий (№ 102) (1958) и лоуренсий (№ 103) (1961). Следует упомянуть, что, по утверждению советского академика Г. Н. Флерова, элементы с Z = 102 и 103 были достоверно идентифицированы в Дубне в 1963–1966 гг.

Элемент № 101 получил название «менделевий» в честь великого русского ученого. Синтез менделевия, который получили в начале экспериментов лишь в количестве нескольких атомов (11), подтвердил заключение ученых о том, что возможности использования для бомбардировки мишеней легких частиц (альфа-частиц, дейтронов) исчерпаны. И в 1950-е гг. физики перешли к новым методам синтеза – к реакциям слияния с участием тяжелых ионов (^{12}C, ^{18}O, ^{22}Ne и др.) [6].

Для целей осуществления ядерных реакций на ускоренных тяжелых ионах разработаны специальные ускорители тяжелых ионов, в том числе в 1960 г. создан циклотрон У-300 в Дубне. Получение элементов с $Z \geq 102$ являлось очень сложной экспериментальной задачей. Образование ядер этих элементов, происходит в конкуренции с делением составного ядра, в которое вносится большая энергия возбуждения (40–50 МэВ). Поэтому эти реакции были названы «реакциями горячего синтеза». Например, при синтезе 102-го элемента в реакции $^{238}U(^{22}Ne,4n)^{256}No$ отношение вероятности деления к вероятности получить искомое ядро ^{256}No равно ~ 108. Это означает, что за несколько часов эксперимента можно получить только полтора-два десятка атомов нобелия [7].

Возврат к реакциям горячего синтеза с использованием в качестве бомбардирующих частиц иона ^{48}Ca привел российских ученых к ряду впечатляющих открытий в области сверхтяжелых элементов. В качестве мишенного материала применяли изотопы актинидов (U, Np, Pu, Am, Cm, Cf). Проведенные эксперименты привели к синтезу шести сверхтяжелых химических элементов в области Z = 113–118, которые завершили седьмой период Периодической системы Д. И. Менделеева. В исследованиях, отмечено авторами этих открытий, впервые были получены и определены свойства распада ядер свыше 50 новых изотопов элементов 104–118, обладающих большим избытком нейтронов. Они существенно пополнили карту нуклидов и расширили ее до Z = 118 [8; 9].

Проблема верхней границы Периодической таблицы возникла практически сразу же после установления Периодического закона и до сих пор остается одной из самых актуальных в современном естествознании.

В рамках квантовой электродинамики таблицу Менделеева можно рассчитать в детальных подробностях, что делалось неоднократно в так называемом нерелятивистском приближении, вплоть до элемента с атомным номером 172. Сколько может быть элементов в Периодической таблице и как определяются ее границы, нужно рассматривать с двух позиций – ядерной физики и атомной физики. В первом случае атом (элемент) есть, пока существует ядро с периодом полураспада не менее 10^{-14} с (время, необходимое для того, чтобы вокруг ядра образовалась соответствующая электронная структура атома). Во втором – атом (элемент) существует до тех пор, пока никакие дополнительные (ранее не учтенные) эффекты не изменят предсказаний квантовой электродинамики.

С увеличением атомного номера элемента растет электрическое поле ядра, в котором двигаются электроны. По мере приближения их скорости к скорости света, согласно теории относительности, растет релятивистская масса электрона. Это в первую очередь относится к электронам на внутренних орбитах, ближайших к ядру, движущихся с максимальной скоростью. Релятивистский эффект приводит к сжатию внутренних орбит (релятивистское сжатие). Эффект должен быть учтен в расчете структуры сверхтяжелого атома, что не было сделано в упомянутых выше нерелятивистских расчетах [10; 11].

Не менее важны и последствия сжатия внутренних орбит, такие как экранирование поля ядра, электронные корреляции на внешних орбитах, а также другие поправки более высокого порядка. Первые наблюдения релятивистского эффекта в 12-й группе таблицы Менделеева были проведены в Дубне в 2007 г. с 3,6-секундным изотопом 112-го элемента коперниция (Cn) и его легким гомологом – ртутью (Hg). Последующие измерения для элементов 14-й группы флеровия (Fl) и свинца (Pb) показали сильный рост этого эффекта [12; 13].

Теоретические предсказания того, какую часть таблицы Менделеева еще предстоит заполнить, довольно сильно разнятся. Физик Ричард Фейнман предсказывал, что последним элементом Периодической системы станет элемент № 137. Это предсказание опирается на эйнштейновскую модель относительности: по мере увеличения заряда ядра электроны начинают двигаться все быстрее и быстрее, и в какой-то момент скорость электронов, при которой они не упадут на ядра, должна превысить скорость света, что физически невозможно. Другие расчеты говорят о том, что предел Периодической системы расположен гораздо дальше – в районе ядра, содержащего около 170 протонов [14].

Эксперименты по «горячему» слиянию атомных ядер позволили получить более богатые нейтронами изотопы трансактиноидов, и их устойчивость оказалась на порядки выше. Новый толчок в развитии представлений о строении атомного ядра привел к предсказанию так называемого «острова стабильности» для насыщенных нейтронами атомных ядер в области Z = 114; дальнейшие эксперименты и уточнения ядерной модели отодвинули «центр» этого острова в область Z = 120. На практике с помощью реакций «горячего» слияния ядер удалось достичь лишь «берега» этого острова, однако для получения наиболее стабильных ядер в этой области необходимо слишком большое количество нейтронов.

Уточненные модели атомного ядра предсказывают также наличие второго «острова стабильности» в области Z = 164. И если пока не найдены способы получить такие ядра искусственно, не следует исключать возможность их образования в космосе в ходе так называемого r-процесса (от англ. rapid – ‘быстрый’), т. е. процесса быстрой «накачки» атомных ядер нейтронами. Например, при взрывах сверхновых звезд плотность нейтронного потока превышает 1022 нейтрона в секунду на квадратный сантиметр, в результате чего за короткое время из ядер железа в большом количестве синтезируются сверхтяжелые ядра. Если будут надежно предсказаны спектры пока еще не полученных сверхтяжелых элементов, а астрономам удастся добиться хорошего отношения сигнал/шум, то, возможно, первые атомы этих элементов будут обнаружены именно в космосе, а не в земных условиях. В любом случае, есть вероятность того, что рассуждения о химии элементов в области Z = 164 окажутся вероятными [13; 14].

Попытка синтеза элемента 119 предпринималась в 1985 г. при помощи бомбардировки мишени из эйнштейния-254 ядрами кальция-48 на ускорителе Super HILAC в Беркли. К сожалению, не удалось идентифицировать ни одного атома. Наряду с российскими физиками из ОИЯИ опыты по синтезу элемента 119 сейчас готовятся в Центре по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца (Германия) и Институте

физико-химических исследований (RIKEN, Япония). Так, для получения 119-го элемента японские ученые собираются соединить ядра 23-го элемента ванадия и 96-го элемента кюрия, а для получения 120-го элемента – ядра того же кюрия и 24-го элемента – хрома.

Исследователи надеются, что дважды магические изотопы унбинилия и унбигексия (элемента № 126), содержащие и магическое количество протонов, и магическое количество нейтронов, должны жить гораздо дольше, чем другие изотопы этих элементов. Правда, оценка времени жизни этих ядер достаточно сильно различается, и может исчисляться как десятками минут, так и миллионами лет.

В подтверждение гипотезы «острова стабильности» исследователи уже приводят информацию об устойчивости известных изотопов сверхтяжелых элементов, содержание нейтронов в которых приближается к магическому числу 184. Анализ опубликованных результатов показывает, что в области $120 < Z < 155$ однозначно определить структуру электронного облака пока что невозможно, и лишь некоторые общие тенденции могут быть предсказаны с достаточной уверенностью. Однако для $Z > 155$ обнаруживается весьма интересное стечение обстоятельств: сближаются по энергии 7d- и 9s-подуровни, а затем 8p и 9p, после которых образуется большой энергетический зазор.

Таким образом, если исходить из аналогий в химических свойствах, в главном ряду восьмого периода следует поместить элементы 119, 120 и 157–172 как аналоги элементов пятого периода. Элементы же 121–156 можно назвать «ультрапереходными» и вынести в дополнительную вставку из двух рядов по 18 элементов, изящно совпадающих по длине с основной таблицей, и расположенных аналогично семействам лантаноидов и актиноидов. Такое расположение обосновано еще и тем, что эволюция предсказанных свойств ультрапереходных элементов напоминает картину, сложившуюся в семействах f-элементов [13].

В настоящее время остается под вопросом, является ли 118-й элемент благородным газом. Он может продемонстрировать принадлежность к 18-й группе, хотя, возможно, и не будет газом при комнатной температуре. Вероятно также, что у 119-го элемента обнаружится скачок химических свойств – от характерных для 18-й группы Периодической таблицы до известных у элементов 1-й группы. Но определенно релятивистский эффект заметно ослабит эти изменения. Есть основания полагать, что при дальнейшем увеличении атомного номера уже для элементов 121–123 групповые отличия почти исчезнут. По сути, исчезнет периодичность в изменении химических свойств элементов. На смену старой Периодической таблице придет новая, сильно измененная в начале восьмого периода [13; 14].

Периодическая система химических элементов претерпела много изменений за 150 лет существования. С 1869 г. и по настоящее время было создано огромное количество вариантов таблиц химических элементов, многие из которых отражают те или иные фундаментальные закономерности их строения и взаимосвязи, в том числе и ранее не известные. Из современных вариантов систем химических элементов особый интерес, на наш взгляд, представляют сотовая система элементов, предложенная Б. Н. Гердевым, естественная матрица фундаментальных законов строения физико-химических элементов, их оболочек, ядер и атомов в целом Ю. А. Галушкина, а также таблица А. В. Градобоева и В. С. Матвеева, которые установили закономерности строения элементов и попытались определить конечность Периодической системы.

Естественная сотовая система химических элементов, экзотическая форма графического выражения Периодического закона, представляет собой последовательную (естественную) запись химических элементов в порядке возрастания атомного номера, без «разрывов», характерных для Периодической системы. Последовательная запись

элементов в порядке возрастания осуществляется здесь в особой сотовой структуре, состоящей из треугольных ячеек. Здесь, начиная с водорода, элементы заполняют ячейки сотовой системы друг за другом в порядке возрастания атомного номера по спирали от центра к периферии таблицы (рисунок 10).

Рисунок 10. – Сотовая система химических элементов Б. Н. Гердева

Сотовая система химических элементов представляет собой множество уложенных в куб элементарных равносторонних треугольников (сот), занятых тем или иным элементом. Интересно, что при размере стороны элементарного треугольника 1,1 мм 150 химических элементов умещаются в куб размером 55 мм. У этого куба есть две особенности: первая – совокупность элементов представляет собой спираль, уложенную в куб; вторая – элементы занимают только три из шести граней куба [15].

Таблица Ю. А. Галушкина, особенно ее реконструкция в виде 3D-модели, позволяет обнаружить, что в основе «законов строения Ядра и Атома в целом лежат Законы Простых (неделимые) природообразующих Prima (P) чисел». При этом строение матрицы соответствует строению природных и искусственных кристаллов и даже монокристаллов.

3D-спирально пространственная расходящаяся система каркаса матрицы химических элементов имеет 4 блока периодичности:

– первый блок A химических элементов образуют всего два химических элемента: водород H^1 и гелий He^2;

– второй блок B составляют химические элементы от лития Li^3 до аргона Ar^{18};

– третий блок C состоит из элементов от калия K^{19} до ксенона Xe^{54};

– четвертый блок химических элементов D имеет элементы от цезия Cs^{55} до оганесона Og^{118} [16].

Третья таблица, А. В. Градобоева и В. С. Матвеева, увязывает число элементов с числом изотопов и элементарных частиц. При этом существование предельного числа химических элементов предопределяет конечность числа элементарных частиц [17].

Кроме того, следует отметить работы Д. Х. Базиева по созданию завершенной системы элементов Периодической системы Д. И. Менделеева, а также исследования А. М. Дроздова, Н. С. Имянитова и др.

Предсказанные «островки стабильности» наводят на мысль о новой загадке Периодического закона: его строгость заметно коррелирует с устойчивостью атомных ядер. «Периодическая система Менделеева и по сей день служит основой для наиболее тонких и сложных исследований» (Глен Сиборг).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азимов, А. Краткая история химии. Развитие идей и представлений в химии / А. Азимов. – М. : Мир, 1983. – 261 с.

2. Менделеев, Д. И. Периодический закон. Основные статьи / Д. И. Менделеев ; ред. ст. и примеч. Б. М. Кедрова. – М. : Изд-во АН СССР, 1958. – 830 с.

3. Волков, В. А. Выдающиеся химики мира / В. А. Волков, Е. В. Вонский, Г. И. Кузнецова // Биографический справочник / под ред. проф. В. И. Кузнецова. – М. : Высш. шк., 1991. – 221 с.

4. Кадзи, М. Сравнительный анализ восприятия Периодической системы в разных странах в период с 1870-х по 1920-е годы / М. Кадзи // Успехи в химии и химической технологии. – 2014. – Т. 28, № 4 (153). – С. 8–11.

5. Fricke, B. Dirac-Fock-Slater calculations for the elements Z = 100, fermium, to Z = 173 / B. Fricke // At. Data Nucl. Data Tables. – 1977. – № 19. – P. 83–95.

6. Петржак, К. А. Спонтанное деление урана / К. А. Петржак, Г. Н. Флеров // Журн. эксперим. и теорем. физики. – 1940. – Т.10, вып. 9–10. – С. 1013.

7. Дубна – остров стабильности : Очерки по истории Объединенного института ядерных исследований, 1956–2006 гг. / под общ. ред. В. Г. Кадышевского, А. Н. Сисакяна. – М. : Академкнига, 2006. – 643 с.

8. Оганесян, Ю. Ц. Синтез и исследование свойств сверхтяжелых атомов. Фабрика сверхтяжелых элементов / Ю. Ц. Оганесян, С. Н. Дмитриев // Успехи химии. – 2016. – № 85 (9). – С. 901.

9. Пресс-релиз Объединенного института ядерных исследований. Открытие новых химических элементов с номерами 113, 115, 117 и 118 [Электронный ресурс] // ОИЯИ. – 6.01.2016. – Режим доступа: http://www.jinr.ru/posts/otkrytienovyh-himicheskih-elementov-s-nomerami-113-115-117-i.

10. Имянитов, Н. С. Новая основа для описания периодичности / Н. С. Имянитов // Журн. общ. химии. – 2010. – Т. 80, вып. 1. – С. 69–72.

11. Сергина, М. Н. Проблема верхней границы периодической системы Д. И. Менделеева / М. Н. Сергина, А. М. Зимняков // Изв. Пенз. гос. пед. ун-та им. В. Г. Белинского. – 2006. – № 5. – С. 231–234.

12. Грайнер, В. В. Расширение Периодической системы элементов: сверхтяжелые – супернейтронные / В. В. Грайнер // Успехи химии. – 2009. – № 78 (12). – С. 1177–1199.

13. Оганесян, Ю. Ц. Синтез и изучение свойств новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева / Ю. Ц. Оганесян // Вестн. Рос. фонда фундам. исслед. – 2019. – № 1 (101). – С. 87–94.

14. Pyykkö, P. A suggested periodic table up to Z ≤ 172, based on Dirac-Fock calculations on atoms and ions / P. Pyykkö // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2011. – № 13 (1). – P. 161–168.

15. Естественная система химических элементов Б. Н. Гердева [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gerdev-sota.narod.ru. – Дата доступа: 05.10.2019.

16. Галушкин, Ю. А. К вопросу о значении и ключевой роли открытия новых альтернативных источников энергии для устойчивого развития общества / Ю. А. Галушкин // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. – 2015. – № 1. – С. 51–54.

17. Градобоев, А. В. Закономерности строения элементов и конечность Периодической системы Д. И. Менделеева / А. В. Градобоев, В. С. Матвеев // Томск : Изд-во Том. полит. ун-та, 2008. – 183 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 15.10.2019

***Stupen N. S.* Development of the Periodic System of Chemical Element**

The article considers the main stages and prospects of development of the periodic table of chemical elements and synthesis of new elements.

УДК 598.265.1(476.7)

И. В. Абрамова[1], В. Е. Гайдук[2]
[1]канд. биол. наук, доц., декан географического факультета
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
[2]д-р биол. наук, проф. каф. зоологии и генетики
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: iva.abramova@gmail.com

СИНАНТРОПИЗАЦИЯ И УРБАНИЗАЦИЯ СИЗОГО ГОЛУБЯ (*COLUMBA LIVIA*, COLUMBIFORMES) В ЮГО-ЗАПАДНОЙ БЕЛАРУСИ

*На основании собственных многолетних (2007–2018) исследований в юго-западной Беларуси и литературных данных прослежены синантропизация и урбанизация сизого голубя (*Columba livia*,* Columbiformes) *в XX и начале XXI в. в юго-западной Беларуси. Показано, что эти процессы проходили наиболее интенсивно в последние 50 лет в урбанизированных ландшафтах региона (Брест, Ивацевичи, Барановичи, Береза, Кобрин, другие населенные пункты). В последние десять лет численность сизого голубя в регионе стабильна, оценивается в 250–280 тыс. гнездящихся пар.*

Введение

Антропогенная трансформация ландшафтов и возникновение новых биотопов, благоприятных для многих видов птиц, в том числе и сизого голубя, возможность использования новых богатых кормовых ресурсов, укрытий и убежищ искусственного происхождения способствуют формированию у птиц специфических адаптаций. По мере повышения степени антропогенизации ландшафтов происходит снижение видового разнообразия птиц в городах и поселках, сопровождающееся возрастанием численности отдельных видов в них. В результате негативная тенденция снижения численности одних видов может быть компенсирована возрастанием численности других, и общая численность птиц может даже увеличиться.

В настоящее время сизый голубь входит в состав основного синантропного ядра авифауны антропогенных ландшафтов многих регионов [1–4]. Сизого голубя можно использовать в качестве модели для рассмотрения особенностей синантропизации и урбанизации птиц. Это дает возможность проследить изменение в поведении и экологии этого вида при разной степени связи с антропогенным и урбанизированным ландшафтом.

Материал и методы

В исследовании основное внимание уделяли урбанизированным экосистемам. Материал для данной работы был собран в 2007–2018 гг. в городах (Брест, Ивацевичи, Береза, Дрогичин, Каменец, Пружаны), агрогородках (Томашовка, Любищицы и др.), дачных поселках и естественных экосистемах Брестской обл. Применяли общепринятые методы полевых исследований [5]. Наиболее полные данные собраны в г. Бресте. Использованы сведения, опубликованные в монографиях [6; 7].

В г. Бресте в 2007–2018 гг. проведены учеты птиц на постоянных маршрутах (микрорайоны Восток и Ковалево – Южный городок – Набережная – Брестская крепость; Гребной канал – ул. Московская – ул. Ленина – Северный городок – д. Тюхиничи). Длина маршрута составляла 25 км, ширина – 200 м. Общая протяженность учетных маршрутов более 900 км. Маршрут включал участки многоквартирных многоэтажных домов и районы усадебного строительства, участки долин рек Мухавец и Западный Буг в черте г. Бреста.

В урбанизированных экосистемах наряду с учетом птиц на маршрутах вели также синхронный подсчет птиц на небольших фиксированных площадках (окруженные домами газоны и скверы). Полученные данные затем пересчитывались на 1 км² каждого местообитания.

В сборе материалов принимали участие многие поколения студентов биологического и географического факультетов БрГУ имени А. С. Пушкина во время проведения полевых практик по зоологии позвоночных и экологии, а также при выполнении курсовых и дипломных работ.

Результаты исследования и их обсуждение

Гнездовой ареал сизого голубя сильно раздроблен, вид распространен в Западной, Центральной и Южной Европе, Шотландии, Ирландии, Малой Азии, на Аравийском полуострове, Ближнем Востоке, в Восточной Азии, Индии, на Шри-Ланке, Африке, на Фарерских островах [8]. Синантропные формы распространены гораздо шире, встречаются на всех континентах, кроме Антарктиды. Вид полностью зависит от отношения к нему человека, использует пищу антропогенного происхождения. Сейчас синантропные формы вида вне человеческих поселений уже не встречаются. В некоторых странах сизый голубь относится к объектам любительской охоты. Он является переносчиком опасных для человека вирусных заболеваний (орнитозов).

Городские поселения сизых голубей, которые привлекли внимание человека, возникли еще в V в. до н. э. Несмотря на то что этому явлению более 2 тыс. лет, процессы синантропизации голубей пристально начали рассматриваться с середины XX в. в связи со все возрастающими масштабами урбанизации [10]. Считают, что доместикация сизого голубя произошла не менее 5–6 тыс. лет назад в Средиземноморье (по другим данным, в Средней и Южной Азии), где обитали дикие популяции в скальных ландшафтах [11]. Человеческие постройки являются аналогами скальных естественных экосистем для этого вида. В мировой фауне известно от 10 до 14 подвидов сизого голубя [12; 13]. Полагают, что предковым видом одомашненных голубей является дикий сизый голубь, в настоящее время насчитывается около 800 пород, в том числе 200 – в России [10].

Процессы синантропизации и урбанизации голубя в Беларуси слабо изучены. Тем не менее литературные сведения и наши наблюдения дают возможность проследить эти процессы на протяжении XX–XXI вв. По данным А. В. Федюшина и М. С. Долбика, в середине XX в. сизые голуби были распространены повсеместно и проживали не только в больших и малых городах (Минске, Пинске, Столине и др.), но и в городских поселках [3]. В настоящее время в Беларуси и регионе сизый голубь является многочисленным видом, который относится к группе полных урбанистов [4; 6; 7; 9]. К гнездованию птицы приступают в январе – начале февраля, за год может быть 3–4 выводка [14]. Размножающиеся птицы встречаются практически в течение всего года.

Численность популяций сизого голубя в городах Брестской области [6; 7], как и в других регионах [1; 2], зависит от их размеров и возраста, наличия пригородов, коммунального устройства. Эти показатели меняются по мере роста населенных пунктов и изменения характера застройки. Можно отметить ряд типов структуры городов, сменяющих друг друга по мере их развития: крупные села (агрогородки) и поселки городского типа (Любищицы, Томашовка, Чернавчицы, Высокое и др.), непосредственно контактирующие с сельской местностью; малые города (Каменец, Береза, Ивацевичи, Дрогичин, Столин и др.), обычно имеющие центральную часть из более крупных построек и зону пригородов с деревянными домами и садами.

Территория г. Бреста (7 372 га) представляет собой мозаичный городской ландшафт, который сочетает в себе зеленые насаждения, застроенную часть, водную поверхность и свободные от зеленых насаждений и застройки участки. Городская застройка представлена массивами многоквартирных многоэтажных домов и районами усадебного строительства. Парки, сады, озелененные места отдыха в жилой застройке и на иных территориях, кладбища, конеферма образуют благоприятные биотопы для сизого голубя. Это относится и к другим городам: Барановичи, Береза, Иваново, Дрогичин, Каменец, Пинск, Столин и др.

Отметим положительные для жизнедеятельности сизого голубя особенности городской среды: появление обильной, хотя и однородной пищи; более ранние сроки весеннего и более поздние сроки осеннего перехода температуры через фенологические рубежи; увеличение степени безопасности птиц (благодаря отсутствию охоты и пернатых хищников); благожелательное отношение к виду; наличие искусственного освещения (обусловливает более длительный период кормовой активности поселковых и городских популяций). В городах размножение птиц идет даже в зимний период, хотя репродуктивная активность сильно снижается в ноябре – январе. Одиночные голуби и их небольшие стайки (5–20 особей) встречаются в различные сезоны года за 10–15 км от ближайшего поселения в поисках корма. В летне-осенний период птицы вылетают на поля, в пригороды где питаются осыпавшимися семенами сорных и культурных растений. Птицы посещают в поисках корма свалки, животноводческие комплексы, очистные сооружения.

Исследования показали, что сизые голуби кормятся в местах массового скопления людей: остановки общественного транспорта, рынки, крупные магазины, парки и др. В городской среде сизые голуби обитают в тех местах, где существуют удобные места для гнездования, пригодная для птиц пища, видоспецифические микроклиматические условия. В городах Брестской области (таблица) обилие сизого голубя летом варьирует от 80,8 (Пружаны) до 210,0 ос./км² (Барановичи), зимой – от 101,6 (Каменец) до 231,0 ос./км² (Барановичи). Биомасса – летом: от 24,2 (Пружаны) до 63,0 кг/км² (Барановичи); зимой: от – 30,5 (Каменец) до 69,3 кг/км² (Барановичи). В агрогородках (Томашовка, Любищицы) плотность населения голубей летом не превышает 30,2 ос./км², зимой – 36,8 ос./км². Наиболее высокие показатели обилия голубей зарегистрированы в кварталах многоэтажной застройкой в микрорайонах «Ковалево» и «Восток» (г. Брест): летом в среднем 280,3 ос./км², зимой – 290,4 ос./км². На территории дачных поселков, расположенных в пригородной зоне г. Бреста, голуби редки, их обилие летом не превышает 5,8 ос./км², зимой – 4,6 ос./км².

На улицах города (набережная имени Ф. Скорины, Советская, Ленина и др.) в течение года жители города подкармливают этих птиц (скопления насчитывают десятки и сотни особей). Скопления сизых голубей (220–740 особей) в течение года в г. Бресте в 2000–2018 гг. нами отмечены на конеферме в микрорайоне «Ковалево», где птицы кормятся. В 5 км к северу от г. Бреста находится животноводческий комплекс, который посещают городские группы сизых голубей. В течение последних 30 лет мы наблюдали небольшие стайки голубей (5–20 особей), которые летели в сторону комплекса над дачами садового товарищества «Леснянка» и возвращались обратно в город. В светлое время суток во все сезоны года птицы совершают от 30 до 60 таких полетов. Скопления кормящихся сизых голубей (120–450 особей) отмечены в летний и зимний периоды на животноводческом комплексе в агрогородке Томашовка в 1994–2016 гг.

Многолетние исследования плотности летнего и зимнего населения голубей различных урбанизированных экосистем [6] показывают, что плотность населения голубей

варьирует в широком диапазоне. Наибольшая плотность вида летом выявлена в урбанизированных ландшафтах – г. Ивацевичи (60,2 ос./км²), многоэтажные кварталы г. Бреста (50,3 ос./км²), д. Томашовка (60,2 ос./ км²). В зимний период плотность голубей в ряде городов (Барановичи, Кобрин, Пинск, Береза и др.) в большинстве случаев несколько увеличивается.

Таблица. – Обилие (ос/км²) и биомасса (кг/км²) населения сизого голубя в урбанизированных экосистемах юго-западной Беларуси в 2007–2018 гг.

Населенный пункт		Лето		Зима	
		обилие	биомасса	обилие	биомасса
г. Брест	усадебная застройка	108,4	32,5	125,6	37,7
	многоэтажная застройка в микрорайонах «Ковалево» и «Восток»	280,3	84,1	290,4	87,1
	парки	120,0	36,0	83,6	25,2
г. Барановичи		210,0	63,0	231,0	69,3
г. Кобрин		195,6	58,7	205,4	61,6
г. Ивацевичи		106,0	31,8	90,2	27,1
г. Пинск		185,0	55,5	190,2	57,1
г. Береза		120,4	36,1	110,2	33,1
г. Каменец		90,4	27,1	101,6	30,5
г. Столин		145,0	43,5	170,2	52,9
г. Малорита		110,4	33,1	90,5	27,1
г. Пружаны		105,7	31,7	80,8	24,2
д. Чернавчицы (Брестский р-н)		18,0	5,4	24,5	7,3
д. Томашовка (Брестский р-н)		60,2	18,1	66,8	20,0
д. Любищицы (Ивацевичский р-н)		30,0	9,0	36,6	11,0
Дачные поселки Леснянка и Заказанка (Брестский р-н)		5,8	1,7	4,6	1,4

В г. Минске [15] средняя годовая плотность населения голубей составляет 539,4 ос./км² и варьирует от 2,1 (усадебная застройка) до 1332 ос./км² (жилые постройки 1950-х гг. в окрестностях Минского тракторного завода). Авторы не указывают, к какому сезону относятся эти данные. Такая высокая плотность населения голубей в городах и поселках региона нами не отмечена.

Динамика численности урбанизированных популяций сизых голубей на юго-востоке Беларуси прослежена в 1981–1994 гг. [16]. Показано, что в крупных городах численность птиц варьирует от 340,6 до 355,7 ос./км²; в небольших промышленных городах – от 227,5 до 240,5 ос./км², в мелких населенных пунктах – от 31,7 до 38,0 ос./км², на территории животноводческих комплексов – от 729,1 до 746,8 ос./км², в городских парках и зонах отдыха – от 25,6 до 38,9 ос./км². Численность сизого голубя в населенных пунктах относительно стабильна. Плотность населения сизого голубя в многоэтажной застройке г. Гомеля составляет 253,8 ос./км² [17]. Наши данные по обилию сизого голубя в многоэтажных кварталах г. Бреста близки к этим данным.

На протяжении XX в. численность сизого голубя в Ленинграде претерпела резкие изменения [2]. Во время гражданской войны (в начале 1920-х гг.) вид был на грани исчезновения, а во время блокады Ленинграда (1941–1944) голуби полностью исчезли. Считают, что они выселились, а не погибли. Первые залетные голуби были встречены в марте 1948 г., уже к декабрю 1954 г. они распространились на большей части города, позже заселили все его районы. Этот пример, пусть и трагический, свидетельствует, что без подкормки птицы из поселений человека исчезают. Сизые голуби включают

в кормовой рацион семена дикорастущих растений, ржи, пшеницы, ячменя и др. В последнее десятилетие в течение всего года в городах и поселках (гг. Брест, Ивацевичи, Кобрин, Пинск и др.) голуби концентрируются на свалках, около мусорных контейнеров, где кормятся пищевыми отходами. Попадая в условия урбанизированного ландшафта, голуби, как и другие птицы, вырабатывают специальные адаптации. В первую очередь изменяется поведение птиц: они перестают воспринимать человека как источник опасности.

На территории европейской России урбанизация сизого голубя в последние десятилетия XX – начале XXI в. привела к формированию городских популяций. Утечка продуктов питания в городах до конца 1980-х гг. была значительной. Было распространено контейнерное хранение мусора и пищевых отходов во дворах. Изобилие источников корма в течение всего года и терпимое отношение человека к сизому голубю способствовали успешному освоению видом городских территорий. Экономический кризис в России (начиная с 1991–1992 гг.) привел к резкому снижению утечки продуктов питания, что значительно ухудшило состояние кормовой базы для синантропных птиц. Это в некоторой мере относится и к населению птиц городов Брестской области.

Численность сизого голубя в Беларуси на конец XX в. оценивается в 1,2–1,5 млн пар, численность стабильна, периодически бывают небольшие флюктуации [18]. В юго-западной Беларуси численность сизых голубей в последние 10 лет оценивается в 250–280 тыс. гнездящихся пар. Численность стабильна, подвержена периодически небольшим флюктуациям.

Заключение

Основными факторами, обусловившими синантропизацию и урбанизацию сизого голубя в юго-западной Беларуси, являются обилие и доступность кормов антропогенного происхождения, используемых птицами в населенных пунктах. Здесь они почти полностью переходят на питание пищевыми и хозяйственными отходами. Возможность добывать корм в течение года, более комфортные микроклиматические условия, покровительственное отношение людей, практически полное отсутствие пернатых хищников способствуют формированию урбанизированных популяций этого вида. Синантропизация и урбанизация сизого голубя происходит на уровне отдельных особей и их групп, популяций. Проявляется это в увеличении плотности населения птиц в урбанизированном ландшафте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храбрый, В. М. Пути приспособления птиц к урбанизированному ландшафту / В. М. Храбрый // Птицы и урбанизированный ландшафт : сб. кратких сообщений. – Каунас, 1984. – С. 4–8.

2. Мальчевский, А. С. Птицы Ленинградской области и сопредельных территорий : в 2 т. / А. С. Мальчевский, Ю. П. Пукинский. – Л. : ЛГУ, 1983. – Т. 2. – 502 с.

3. Федюшин, А. В. Птицы Белоруссии / А. В. Федюшин, М. С. Долбик. – Минск : Наука и техника, 1967. – 519 с.

4. Гричик, В. В. Животный мир Беларуси. Позвоночные : учеб. пособие / В. В. Гричик, Л. Д. Бурко. – Минск : Изд. центр БГУ, 2013. – 399 с.

5. Вергелес, Ю. И. Количественные учеты населения птиц: обзор количественных методов учета птиц / Ю. И. Вергелес // Беркут. – 1994. – Т. 3, №1. – С. 43–48.

6. Абрамова, И. В. Структура и динамика населения птиц экосистем юго-запада Беларуси / И. В. Абрамова. – Брест : Изд-во БрГУ, 2007. – 208 с.

7. Гайдук, В. Е. Экология птиц юго-запада Беларуси. Неворобьинообразные : монография / В. Е. Гайдук, И. В. Абрамова ; Брест. гос. ун-т. – Брест : Изд-во БрГУ, 2009. – 300 с.

8. Птушкі Еўропы / агульн. рэд. М. Я. Нікіфарава. – Варшава : ПВН, 2000. – 350 с.

9. Долбик, М. С. Ландшафтная структура орнитофауны Белоруссии / М. С. Долбик. – Минск : Наука и техника, 1974. – 312 с.

10. Басыйров, А. М. Этапы урбанизации сизого голубя (*Columba livia*) / А. М. Басыйров, И. И. Рахимов // Экология, эволюция и систематика животных : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Рязань 13–16 нояб. 2012 г. – Рязань : Голос губернии, 2012. – С. 189–190.

11. Резанов, А. Г. Географическая классификация и центры происхождения синантропных популяций у птиц / А. Г. Рязанов, А. А. Рязанов // Вестн. МГПУ. – 2010. – № 1 (5). – С. 39–54.

12. Степанян, Л. С. Состав и распределение птиц фауны СССР. Неворобьинообразные / Л. С. Степанян. – М. : Наука, 1975. – 370 с.

13. Howard, R. A comlete chec-list of the birds of the world / R. Howard, A. Moore. – Oxford : Univ. press, 1980. – 701 p.

14. Никифоров, М. Е. Птицы Беларуси: справочник-определитель гнезд и яиц / М. Е. Никифоров, Б. В. Яминский, Л. П. Шкляров. – Минск : Выш. шк., 1989. – 479 с.

15. Особенности полиморфизма, численности и популяционной гетерогенности синантропного сизого голубя в Минске, странах ближнего и дальнего зарубежья / И. М. Хандогий [и др.] // Актуальные проблемы зоологической науки в Беларуси : сб. ст. XI зоол. междунар. науч.-практ. конф., приуроч. 10-летию основания ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам Беларуси», Минск 1–3 нояб. 2017 г. : в 2 т. / редкол.: О. И. Бородин [и др.]. – Минск : Изд. А. Н. Вараксин, 2017. – Т. 1. – С. 397–406.

16. Кусенков, А. Н. Динамика численности популяций массовых видов синантропных птиц на юго-востоке / А. Н. Кусенков, З. А. Горошко, Н. В. Карлионова // Экологические проблемы Полесья и сопредельных территорий : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, окт. 2000 г. ; редкол.: А. Н. Кусенков [и др.]. – Гомель : ГГУ, 2000. – С. 79–83.

17. Кусенков, А. Н. Структура авифауны и населения птиц многоэтажной застройки города Гомеля / А. Н. Кусенков, Ю. С. Селедцова // Итоги полевого сезона, 2010 г. : материалы I регион. науч. зоол. конф. – Брест : Альтернатива, 2011. – С. 117–120.

18. Птицы Беларуси на рубеже XXI века / М. Е. Никифоров [и др.]. – Минск : Изд. Н. А. Королев, 1997. – 188 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 17.07.2019

Abramova I. V., Gaiduk V. E. **The Synanthropization and the Urbanization of the Common Pigeon (*Columba livia,* Columbiformes) in Southwest of Belarus**

The article tracks the processes of the synanthropization and the urbanization of the Common Pigeon (Columba livia, Columbiformes) in southwest of Belarus. The field work was performed in the years 2007–2018 applying the conventional bird count methods. These processes took place most intensively in the last 50 years in urbanized landscapes of the region (Brest, Ivatsevichi, Baranovichi, Bereza, Kobrin and other settlements). The number of the Common Pigeons in the region has been stable for the last ten years, estimated at 250–280 thousand breeding pairs.

УДК 521.844

В. И. Бойко[1], С. Н. Волосюк[2]
[1]канд. биол. наук, доц., доц. каф. ботаники и экологии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
[2]канд. с.-х. наук, доц. каф. ботаники и экологии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: boikobio@yandex.by

АНАТОМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОРЫ ОДНОЛЕТНЕГО СТЕБЛЯ НЕКОТОРЫХ КУСТАРНИКОВЫХ ПОКРЫТОСЕМЕННЫХ РАСТЕНИЙ

Проведено изучение внутренней структуры коры однолетнего стебля семи видов кустарниковых покрытосеменных растений, относящихся к четырем семействам. Описана топография тканей коры на поперечном срезе, сделан сравнительно-анатомический анализ тканей коры, выявлены диагностические признаки. Наибольшее сходство в строении коры имеют представители семейства Барбарисовые, что подтверждается их единством происхождения. Для всех исследованных видов характерной чертой является наличие гомогенной первичной коры и отсутствие механических элементов в составе вторичной флоэмы.

Введение

Комплексное использование растительных ресурсов должно быть основано на знании не только полезности сырья, но и его структуры, обусловливающей технологию переработки, а также сферу применения. Покрытосеменные растения широко используются как витаминоносные растения, для получения лекарственных препаратов и в целях озеленения парков, приусадебных участков и др. Изучение анатомической структуры коры древесных и кустарниковых растений имеет большое значение в целях диагностики и уточнении границ таксонов, для решения вопросов филогении, а также для проведения научной и криминалистической экспертизы, т. к. ее гистологический состав значительно богаче состава древесины и обладает большим набором диагностических признаков. Значительная часть исследований посвящена не коре в целом как комплексу тканей, а ее отдельным слагающим. Следовательно, основными направлениями в области изучения коры следует считать: а) структурный анализ коры как единого комплекса; б) вовлечение в исследование как можно большего числа видов; в) анализ анатомического строения коры целых таксонов, что даст дополнительную информацию для целей систематики и филогении.

Методы и материалы

Для проведения исследований мы использовали кору однолетнего стебля *Самшита вечнозеленого* (*Buxus sempervirens* L.), *Барбариса обыкновенного* (*Berberis vulgaris* L.), *Барбариса среднего* (*Berberis media* Groot), *Барбариса Тунберга* (*Berberis thunbergii* DC.), *Барбариса оттавского* (*Berberis ottawensis* Schneid), *Калины обыкновенной* (*Viburnum opulus* L.), *Сирени обыкновенной* (*Syringa vulgaris* L.). Сбор полевого материала проводился на территории г. Бреста в отделе агроэкологии Центра экологии Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина. Объекты исследования собирались нами в сентябре – марте 2017–2018 гг., т. е. в период, когда камбий находится в неактивном состоянии. Мы выбирали растения, произрастающие в оптимальных для их жизнедеятельности условиях. Образцы фиксировали в 96 %-ном спирте и выдерживали в смеси спирта и глицерина (1:1). Из последних готовили микрообразцы,

которые использовали для получения срезов, а их окрашивали регрессивным способом, помещая в сафранин и нильский синий. После окраски срезы проводили через растворы спиртов разных концентраций (50, 75 и 96 %-ный спирт). На следующем этапе они обрабатывались карбоксилолом и ксилолом, после чего помещались в канадский бальзам [1].

Результаты исследований и их обсуждение

Самшит вечнозеленый (Buxus sempervirens* L.*). На поперечном срезе однолетнего стебля ткани коры имеют следующую топографию: снаружи располагается эпидерма, граничащая с колленхимой, под которой располагается первичная кора, она кольцом охватывает первичную флоэму. Ко внутри от первичной флоэмы находится вторичная флоэма. К концу первого года развития стебля между вторичной флоэмой и первичной корой закладывается перидерма. Поперечный срез стебля имеет ребристое очертание в поперечном сечении, образуя бугорки и выросты. Снаружи стебель покрыт однослойной эпидермой. Ее наружные тангентальные стенки покрыты слоем кутикулы, толщина которого составляет 2–3 мкм, а ширина ткани составляет 6–9 мкм. Наружные тангентальные и радиальные стенки ткани имеют утолщения, поперечник клеток округлой и овальной формы. Радиальный размер их колеблется в пределах 15–17 мкм, а тангентальный – 18–20 мкм. Клетки образуют одноклеточные трихомы длиной 18–60 мкм.

Под эпидермой располагается колленхима, она представлена 3–4 слоями клеток, которые имеют овальную форму с равномерным утолщенными оболочками. Ширина ткани на поперечном срезе равна 22–28 мкм. Внутрь от колленхимы находится первичная кора. Клетки паренхимы тонкостенные, форма их поперечника может меняться от округлой до многоугольной. Диаметр поперечника составляет 10–14 мкм. Ткань имеет гомогенную структуру. Ширина первичной коры составляет 50–60 мкм.

На первом году стебля между вторичной флоэмой и первичной корой закладывается перидерма. Ткань типичная, состоит из феллемы, феллогена и феллодермы. Последние две ткани сформированы очень мелкими клетками, практически не различимыми в поле зрения светового микроскопа. Феллема образует два слоя клеток в радиальном ряду поперечного среза. Последние имеют квадратную форму со слегка извилистыми стенками.

Вторичная флоэма состоит из ситовидных и запасающих элементов. Механические элементы во флоэме не формируются. Ситовидные элементы представлены ситовидными трубками, поперечные стенки которых сильно наклонены. На последних встречаются овальные ситовидные поля. Диаметр ситовидных полей составляет 2–3 мкм. На поперечном срезе ситовидные трубки располагаются нечеткими радиальными рядами. Их тангентальный размер достигает 8–12 мкм, а радиальный 4–6 мкм. Ситовидные трубки имеют различную форму в поперечнике (от округлой до шестиугольной).

Сердцевинные лучи гомогенные, состоят только из стоячих клеток, их высота составляет 250–350 мкм. Горизонтальная паренхима однорядная, ширина лучей колеблется в пределах 7–8 мкм, слойность – 15–27 клеток. Вертикальная паренхима представлена овальными клетками, которые образуют тяжи из 2–4, диаметр их поперечника равен около 6–7 мкм.

Барбарис обыкновенный (Berberis vulgaris* L.*). Кора однолетнего стебля барбариса обыкновенного достигает ширины 300–400 мкм на поперечном срезе. Ткани имеют следующую топографию: снаружи располагается эпидерма, покрытая кутикулой, которая граничит с первичной корой. Ко внутри от последней расположено кольцо механических элементов, граничащее с перидермой. Самое внутреннее расположение в коре

занимает вторичная флоэма. Эпидерма однослойная, ее клетки на поперечном срезе имеют овальную форму, а на продольном срезе они прямоугольной формы, слегка вытянуты вдоль оси стебля. Тангентальный размер клеток достигает 12 мкм, а радиальный – 10 мкм. Снаружи стебель покрыт сплошным слоем кутикулы, толщина которого достигает 4 мкм.

Под эпидермой находится слой первичной коры, шириной от 10 до 20 мкм, ее клетки слегка сплюснуты, рано отмирают. Со временем клетки первичной коры одревесневают и образуют механические элементы (брахисклереиды). Кольцо первичных механических элементов представлено массивным слоем септированных волокон. Ткань гомогенная, ее ширина достигает 50 мкм. Форма клеток на поперечном срезе 4–5-угольная, на продольном срезе – это прозенхимные структуры с заостренными концами. Стенки клеток равномерно утолщены. Тангентальный размер клеток составляет от 4 до 7 мкм, а радиальный – 10–12 мкм.

Перидерма имеет типичное строение. Она состоит из феллемы, феллодермы и феллогена. Феллема гомогенная, представлена тонкостенными крупными клетками, заполненными воздухом, которые на поперечном срезе имеют прямоугольную форму. Ширина ткани в поперечнике равна от 20 до 70 мкм. Клетки пробки образуют два слоя в радиальном ряду на поперечном срезе однолетнего, их тангентальный размер составляет 8–10 мкм, а радиальный – от 7 до 12 мкм.

Под перидермой хорошо сохраняется вторичная флоэма, большую ее часть занимают членики ситовидных трубок, поперечник которых многоугольной и овальной формы. Флоэма представлена только проводящими и запасающими элементами (механические отсутствуют). Тангентальный размер ситовидных трубок составляет около 6–12 мкм, а радиальный – от 6 до 9 мкм. Высота члеников ситовидных трубок достигает 40–50 мкм. Ситовидные трубки имеют поперечные стенки, перпендикулярно расположенные по отношению к продольным. Лучи однорядные, их слойность составляет 17–28 клеток, высота – 350–600 мкм, ширина – 12–16 мкм. Вертикальная паренхима сложена 4–8 клетками, диаметр которых равен 8–9 мкм. Ширина вторичной флоэмы на поперечном срезе достигает 35–45 мкм.

***Барбарис средний (Berberis media* Groot).** Анатомическое строение коры барбариса среднего схожее с уже описанным выше барбарисом обыкновенным, но имеет отличительные особенности. Ширина коры на поперечном срезе составляет около 300 мкм. Кора барбариса среднего имеет следующую топографию тканей: снаружи располагается эпидермис с кутикулой, под которым находится слабо выраженная первичная кора и кольцо механических элементов, ко внутри от последнего закладывается перидерма. Самое внутреннее положение занимает вторичная флоэма. Эпидерма представлена одним слоем равно утолщенных клеток, имеющих овальную форму в поперечнике. Ткань покрыта слоем кутикулы толщиной 3–4 мкм. Радиальный размер клеток кожицы составляет около 9 мкм, а тангентальный – 17–34 мкм. Внутрь от эпидермы располагаются клетки первичной коры, которые очень сильно сминаются и рано отмирают. Ширина первичной коры на поперечном срезе от 15 до 35 мкм. Клетки ткани со временем одревесневают и образуют кольцо идиобластов. Механическое кольцо располагается под первичной корой, его ширина составляет от 60 до 80 мкм на поперечном срезе. Кольцо первичных механических элементов представлено волокнами, поперечник которых имеет вид пяти-, шестиугольников. Радиальный размер волокон составляет от 13 до 20 мкм, а тангентальный – от 5 до 10 мкм на поперечном срезе.

Перидерма типичная, ее феллема представлена двумя слоями тонкостенных клеток пробки в радиальном ряду поперечного среза, они заполнены воздухом, их форма прямоугольная или квадратная. Ширина пробкового слоя на поперечном срезе от 20 до 33 мкм. Радиальный размер клеток пробки колеблется от 10 до 13 мкм, а тангентальный – 7–9 мкм. Феллоген и феллодерма не обладают диагностическими признаками. Ширина перидермы на поперечном срезе достигает примерно 40–60 мкм.

Самое внутреннее расположение имеет вторичная флоэма. Ткань лишена механических элементов, представлена только проводящими и запасающими, ее ширина на поперечном срезе составляет примерно 28–30 мкм. Тангентальный размер члеников ситовидных трубок составляет 7–9 мкм, а радиальный – 8–10 мкм, высота их достигает 30–58 мкм. Лучи однорядные, их слойность составляет 15–26 клеток, высота – 370–550 мкм, ширина – 13–17 мкм. Вертикальная паренхима сложена тяжами из 3–6 клеток, их диаметр равен 12–15 мкм. Ширина вторичной флоэмы на поперечном срезе достигает 30–40 мкм.

Барбарис Тунберга (Berberis thunbergii* DC.*). Ширина коры на поперечном срезе однолетнего стебля составляет 307,5–615 мкм. Ткани имеют следующую топографию на поперечном срезе: снаружи располагается эпидерма, которая очень рано отмирает, под ней формируется кольцо механических элементов, под которым закладывается перидерма, а самое внутреннее положение занимает флоэма. Клетки эпидермы имеют овальный поперечник и утолщенные наружные стенки. Тангентальный размер клеток колеблется от 20 до 35 мкм, а радиальный – 10–15 мкм. Их наружные стенки покрыты слоем кутикулы, толщина которого составляет около 6 мкм. Ткань представлена двумя слоями клеток. Под эпидермой располагаются клетки первичной коры, которые очень сильно сминаются и рано отмирают, образуя при этом кольцо брахисклереид. Ширина первичной коры на поперечном срезе достигает 30 мкм. Механическое кольцо располагается ко внутри от первичной коры, ширина ткани составляет от 80 до 220 мкм. Оно представлено волокнами, поперечник которых имеет пяти-, шестиугольную форму, а иногда округлый. Радиальный размер волокон составляет от 18 до 25 мкм, а тангентальный от 20 до 28 мкм. Толщина стенок достигает 4–5 мкм. Волокна септированы, их длина составляет 350–500 мкм. Перидерма типичная, ширина ткани на поперечном срезе составляет 60 мкм. Феллема представлена двумя слоями тонкостенных клеток, заполненных воздухом. Радиальный размер их колеблется от 18 до 37 мкм, а тангентальный – от 20 до 30 мкм. Самое внутреннее расположение в коре имеет вторичная флоэма. Ткань лишена механических элементов, представлена только проводящими и запасающими. Ширина ткани на поперечном срезе составляет около 140 мкм. Проводящие элементы – членики ситовидных трубок, которые имеют тангентальный размер 17–20 мкм, а радиальный – 16–21 мкм. Длина члеников ситовидных трубок составляет от 40 до 60 мкм, они имеют наклонные поперечные стенки. Лучи могут быть как одно-, так и двухрядными, их ширина на поперечном срезе составляет около 20–40 мкм, высота – 280–370 мкм, а слойность 29–37 клеток. Во флоэме лучи подвергаются дилатации.

Барбарис оттавский (Berberis ottawensis* Schneid*). Ткани коры однолетнего стебля имеют следующую топографию на поперечном срезе: снаружи располагается однослойная эпидерма, ко внутри от которой находится первичная кора, переходящая в кольцо механических элементов, ко внутри от которого находится перидерма. Самое внутреннее расположение имеет вторичная флоэма. Эпидерма представлена однослойной тканью, поперечник ее клеток овальной формы. Тангентальный размер последних составляет 20–24 мкм, а радиальный – 10–12 мкм. Слегка утолщены наружные танген-

тальные стенки, которые покрыты слоем кутикулы толщиной 2–4 мкм. Трихомы в эпидерме не обнаружены. Кольцо механических элементов гомогенное, состоит из шестиугольных в поперечнике прозенхимных клеток. Радиальный размер их составляет 23–30 мкм, тангентальный – 17–20 мкм, а высота – 230–340 мкм. Изнутри с механическим кольцом граничит перидерма. Ткань типичная, состоит из феллогена, феллодермы и феллемы. Клетки пробки таблитчатой формы, их тангентальный размер составляет 23–29 мкм, а радиальный – 20–26 мкм. В радиальном ряду на поперечном срезе располагается два слоя клеток феллемы. Вторичная флоэма состоит из проводящих и запасающих элементов. Диаметр поперечного сечения члеников ситовидных трубок составляет 9–12 мкм, а их длина – около 30–50 мкм. В поперечнике они четырех-, пятиугольной формы, расположены на поперечном срезе радиальными рядами. В радиальном ряду поперечного среза насчитывается 9–12 члеников ситовидных трубок. Лучи однорядные, гомогенные, их слойность составляет 12–20 клеток, высота – 300–450 мкм, а ширина – 12–16 мкм. Вертикальная паренхима сложена 2–6 клетками, их диаметр равен 10–12 мкм. Ширина вторичной флоэмы на поперечном срезе достигает 35–50 мкм.

***Калина обыкновенная (Viburnum opulus* L.).** Кора однолетнего стебля на поперечном срезе имеет следующую топографию тканей: снаружи располагается однослойная эпидерма, под которой формируется перидерма, внутрь от которой находится коровая паренхима. Первичная кора граничит с флоэмой. Наружная часть флоэмы представлена первичной флоэмой. Вторичная флоэма составлена мелкими тонкостенными проводящими элементами, которые располагаются узкими радиальными полосками на поперечном срезе. Эпидерма представлена одним слоем клеток, которые на поперечном срезе имеет овальную форму. Радиальный размер клеток достигает 10–15 мкм, а тангентальный – от 20–30 мкм. Трихомы в клетках эпидермы не обнаружены. Клеточные стенки снаружи покрыты кутикулой, толщина которой достигает 5 мкм. Внутрь от эпидермы располагается перидерма. Ткань имеет типичное строение и состоит из феллемы, феллогена и феллодермы. Феллема многослойная, представлена тонкостенными клетками, тангентальный размер которых составляет 25–38 мкм, а радиальный 30–40 мкм. В радиальном ряду поперечного среза однолетнего стебля насчитывается 4–5 слоев клеток феллемы. Оболочки их слегка извилистые, тангентальные, выгнуты к периферии органа, заполнены воздухом. Феллоген представлен одним слоем живых клеток прямоугольной формы с тонкими оболочками, они сложены плотно. Феллодерма состоит из двух-трех слоев клеток на поперечном срезе. Тангентальный размер клеток оставляет 20–30 мкм, а радиальный 12–20 мкм. Ширина перидермы на поперечном срезе достигает 160 мкм. Внутрь от перидермы располагается первичная кора. Ткань гомогенная, представлена овальными клетками, тангентальный размер которых 20–28 мкм, а радиальный 19–23 мкм. Изредка в клетках первичной коры встречается друзы оксалата кальция. Ширина ткани на поперечном срезе составляет примерно 40–60 мкм. Самое внутреннее расположение в коре занимает вторичная флоэма. Ее ширина на поперечном срезе достигает 30-40 мкм. Ткань состоит из проводящих и запасающих элементов, механические элементы отсутствуют. Проводящие элементы представлены ситовидными трубками, их тангентальный размер составляет 10–15 мкм, а радиальный размер 8–14 мкм. На поперечном срезе поперечник имеет форму четырех- и пятиугольников и членики располагаются радиальными рядами. Запасающие элементы представлены горизонтальной и вертикальной паренхимой. Горизонтальная паренхима представлена однорядными лучами, ширина которых на поперечном срезе составляет от 4 до 10 мкм. Аксиальная

паренхима состоит из овальных клеток, диаметр которых около 10–14 мкм, в них изредка встречаются друзы оксалата кальция.

***Сирень обыкновенная (Syringa vulgaris* L.).** Однолетний стебель покрыт слоем эпидермы, ткань представлена одним слоем клеток. Последние имеют овальную форму, их радиальный размер составляет до 12 мкм, а тангентальный – около 17 мкм. Субэпидермально располагается перидерма, ширина которой на поперечном срезе достигает 90 мкм. Ткань типичная, представлена феллодермой, феллогеном и феллемой. Клетки феллемы имеют прямоугольную форму. Радиальный размер их составляет 10–12 мкм, а тангентальный – 12–14 мкм. Высота клеток на продольном срезе колеблется около 15–18 мкм. Клетки имеют слегка волнистые стенки. В радиальном ряду поперечного среза находится 3–4 клетки пробки. Под перидермой располагается первичная кора. Ткань имеет ширину на поперечном срезе 100–110 мкм. Она гомогенная, состоит из мелких клеток диаметром до 20 мкм. Глубже от первичной коры располагается гомогенное кольцо механических элементов, которое состоит из септированных волокон. Длина волокон составляет 250–350 мкм, а диаметр их – 10–12 мкм. Внутрь от механического кольца располагается вторичная флоэма. Ширина ткани на поперечном срезе примерно равна 60 мкм. Ткань представлена проводящими и запасающими элементами. Механические элементы отсутствуют. Проводящие элементы представлены ситовидными трубками с клетками-спутницами. На поперечном срезе членики ситовидных трубок имеют диаметр 9–12 мкм, а высота члеников достигает 45–85 мкм. Поперечная стенка располагается перпендикулярно по отношению к продольным. Запасающие элементы представлены вертикальной и горизонтальной паренхимой. Клетки вертикальной паренхимы имеют диаметр 12–14 мкм, а горизонтальная представлена лучами. Лучи однорядные (реже двурядные) и достигают высоты в 250–400 мкм. Слойность лучей составляет 13–28 клеток, а ширина – 12–18 мкм.

Заключение

Таким образом, исследована анатомическая структура коры однолетнего стебля семи кустарниковых пород покрытосеменных растений, относящихся к четырем семействам (1 – Самшитовые, 4 – Барбарисовые, 1 – Адоксовые, 1 – Маслинные). Кора всех исследованных видов сложена тканями как первичного (эпидерма, первичная кора, кольцо первичных механических элементов), так и вторичного происхождения (перидерма, вторичная флоэма). Общими признаками, характерными для изученных растений, является наличие гомогенной первичной коры и отсутствие во вторичной флоэме механических элементов.

Наибольшая схожесть признаков характерна для представителей семейства Барбарисовые (род Барбарис – 4 вида): отсутствие трихом в эпидерме, перидерма формируется между механическим кольцом и вторичной флоэмой, отсутствие колленхимы, отсутствие кристаллов в клетках первичной коры, склерификация клеток коровой парехимы. Такое большое сходство в структуре комплекса ткани говорит о единстве происхождения этих видов, что подтверждает положения закона гомологических рядов Н. И. Вавилова. Тем не менее Барбарис Тунберга характеризуется наличием двуслойной эпидермы – единственный признак, который отличает его от других представителей рода. Все остальные различия являются количественными, они больше зависят от экологических условий произрастания. Самшит вечнозеленый отличается от других изученных объектов наличием колленхимы и трихом в эпидерме. Калина обыкновенная выделяется среди всех содержанием кристаллов в клетках первичной коры, и только

у нее и сирени обыкновенной перидерма закладывается субэпидермально, а в радиальном ряду поперечного среза располагается три и более клеток феллемы.

Анализ анатомического строения коры однолетнего стебля исследованных видов позволил выявить диагностические признаки, которые сведены в таблице.

Таблица. – Диагностические признаки коры однолетнего стебля

Признак	Самшит вечнозеленый	Барбарис обыкновенный	Барбарис средний	Барбарис Тунберга	Барбарис оттавский	Калина обыкновенная	Сирень обыкновенная
Эпидерма однослойная	+	+	+	-	+	+	+
Эпидерма двухслойная	–	–	–	+	–	–	–
Наличие трихом	+	–	–	–	–	–	–
Отсутствие трихом	–	+	+	+	+	+	+
Перидерма формируется субэпидермально	–	–	–	–	–	+	+
Перидерма формируется между флоэмой и механическим кольцом	+	+	+	+	+	–	–
В радиальном ряду однолетнего стебля менее 3 слоев клеток феллемы	+	+	+	+	+	–	–
В радиальном ряду однолетнего стебля 3 и боле слоя клеток феллемы	–	–	–	–	–	+	+
Колленхима имеется	+	–	–	–	–	–	–
Первичная кора гомогенная	+	+	+	+	+	+	+
Наличие кристаллов в первичной коре	–	–	–	–	–	+	–
Клетки первичной коры склерифицируются	–	+	+	+	+	–	–
Флоэма не содержит механических элементов	+	+	+	+	+	+	+

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прозина, М. Н. Ботаническая микротехника / М. Н. Прозина. – М. : Высш. шк., 1960. – 206 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 29.09.2019

Boyko V. I., Volosyuk S. N. **Anatomical Characteristics of the Bark of an Annual Stem of Some Shrub Angiosperms**

A study was made of the internal structure of the bark of an annual stem of seven species of shrub angiosperms belonging to four families. A topography of the cortical tissues on a transverse section is described, a comparative anatomical analysis of the cortical tissues is made, diagnostic signs are revealed. Representatives of the Barberry family have the greatest similarity in the structure of the crust, which is confirmed by their unity of origin. For the studied species, a characteristic feature is the presence of a homogeneous primary crust and the absence of mechanical elements in the secondary phloem.

УДК 631.52:581.5:57.04

С. М. Ленивко
канд. биол. наук, доц., доц. каф. зоологии и генетики
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: zoology@brsu.brest.by

ГЕННО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД В СОЗДАНИИ НОВЫХ ФОРМ РАСТЕНИЙ, УСТОЙЧИВЫХ К АБИОТИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ

Рассмотрена генно-инженерная стратегия создания новых форм растений, устойчивых к абиотическим факторам, направленная на снижение климатических рисков в растениеводстве. Представлен обзор основных этапов технологии создания трансгенных растений, позволяющий осознать не только сложность и трудоемкость процесса трансгенеза, но и понимание потенциальных рисков введения генетически модифицированных сельскохозяйственных культур в агроценозы.

Введение

Важной задачей является получение высоких урожаев растений на фоне возрастающих потенциальных рисков, обусловленных неблагоприятными изменениями, происходящими в биосфере. От продуктивности растениеводства напрямую зависит эффективность всего сельскохозяйственного производства. Растительный организм, способный трансформировать энергию солнца в энергию органических соединений, является основополагающим звеном в получении продуктов питания, кормов, сырья, топлива, лекарственных средств. Интенсификация растениеводства в современных условиях должна базироваться на разумном сочетании традиционных подходов с новыми технологиями.

Климатические условия являются особой группой факторов, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур, поэтому составляют агроклиматический ресурс страны. Агроклиматические ресурсы территории Белорусского Полесья являются благоприятными для растениеводства, однако погодные условия конкретного года могут существенно отличаться от средних многолетних, существенно лимитируя урожайность отдельных культур. Исследования климатических особенностей конца XX – начала XXI в. показали, что общие тенденции потепления климата и микроклиматические изменения, связанные с мелиорацией, привели к формированию особых климатических условий на территории Полесского региона. По мнению ряда исследователей [1; 2], юго-западный регион Белорусского Полесья по количественным параметрам климатического потенциала может быть выделен в четвертую агроклиматическую область. Формирующиеся агроклиматические условия позволяют прогнозировать рентабельность выращивания новых для данного региона культур, например арбузов и других бахчевых культур, также получение высоких урожаев ранних овощных и ягодных культур. Наряду с благоприятным соотношением тепла и влагообеспеченности, позволяющим реализовать биоклиматический потенциал Полесского региона в продуктивности растений, отмечаются тенденции, повышающие агроклиматические риски. К ним можно отнести усиление континентальности климата, которое сопровождается увеличением колебаний межсезонных температур, а также дневных и ночных температур в вегетационный период, что угнетающе сказывается на возделываемых культурах. Отмеченные в последние десятилетия метеорологами факты увеличения числа сухих дней в период активной вегетации (с мая по август) порождают опасения возможных засух и увеличения солончакового процесса и в ближайшие десятилетия. В связи с этим своевременным

является анализ возможных направлений получения сортов растений с повышенной адаптивностью к прогнозируемым изменениям климата Полесского региона.

Традиционный селекционный процесс, направленный на создание устойчивых к неблагоприятным погодным условиям среды генотипов растений, в настоящее время не позволяет достичь желаемых результатов по ряду причин. Во-первых, продолжительность традиционного селекционного процесса (около 10–15 лет в зависимости от сельскохозяйственной культуры) не позволяет решить стоящую задачу в короткий срок. Во-вторых, недостаток фундаментальных знаний о молекулярных механизмах, лежащих в основе устойчивости растений к абиотическим стрессам, затрудняет создание новых элитных сортов. В-третьих, потенциал генофондов большинства культур практически исчерпан, поэтому в селекцию вовлекаются виды дикорастущих сородичей культурных растений с помощью отдаленной гибридизации, которая в свою очередь сопряжена с рядом трудностей. Современный подход к решению задачи увеличения толерантности сельскохозяйственных культур к абиотическим стрессам основан на интеграции в селекционный процесс биотехнологических (клеточной и генетической инженерии) и молекулярных методов.

Модификации высокопродуктивных растений с целью придания им устойчивости к абиотическому стрессу основаны большей частью на манипуляциях с генами, ответственными за защиту и поддержание функции и структуры компонентов клетки. Генетическая инженерия позволяет переносить от одного вида к другому определенные гены, тем самым передать признак, обеспечивающий устойчивость к какому-либо фактору.

Организм, содержащий чужеродный генетический материал, введенный с помощью методов генной инженерии, называется трансгенным или генетически модифицированным. Технология создания трансгенных растений включает следующие этапы:

1) выбор специфического гена;
2) подбор генотипа растения-реципиента;
3) введение гена и оценка его экспрессии в геноме растения-реципиента;
4) регенерация растений из трансформированных клеток;
5) отбор трансгенных растений и испытания в полевых условиях.

Выбор специфического гена определяется задачами, направленными на придание растениям особого признака. Большинство генов, определяющих эти признаки, выделены из бактериальных геномов или геномов диких видов растений. Выявленное сходство в биохимических процессах, направленных на формирование стрессового ответа у бактерий и высших растений, позволило использовать бактериальные гены для получения растений, устойчивых к стрессам.

Подбор генотипа растения-реципиента основывается на двух основных требованиях. В качестве реципиента подбираются растения высокоурожайного районированного сорта, имеющего лишь одно отрицательное свойство, которое могло бы быть улучшено с помощью генно-инженерных методов. Также выбор генотипа растения-реципиента определяется способностью его клеток к регенерации в целое фертильное растение, т. к. показано, что это свойство значительно зависит от генотипа.

Введение гена в геном растения-реципиента осуществляется различными методами при помощи векторов. Векторы для введения чужеродного гена в геном растительной клетки были найдены при изучении причин опухолевого заболевания ряда двудольных растений (в частности винограда, косточковых фруктовых деревьев, роз), известного как корончатый галл. Вызывают опухоль у растений Ti-плазмиды (кольцевые внехромосомные малые молекулы ДНК) некоторых штаммов почвенной бактерии *Agrobacterium tumefaciens* (по реклассификации *Rhizobium radiobacter* [3]). Процесс трансформации растений с помощью ризосферных агробактерий происходит следующим

образом. При повреждении растения в нем начинают синтезироваться специфические фенольные вещества, которые узнаются мембранным рецепторным белком агробактерии. В ответ на этот химический сигнал в клетке *A. tumefaciens* активируются гены, обеспечивающие посредством синтезируемых соединений присоединение бактерии к растительной клетке в месте поранения, обычно у основания стебля. После этого происходит активация других генов Ti-плазмиды, необходимых для переноса части ее ДНК (Т-фрагмента) в ядро растительной клетки, где Т-фрагмент встраивается в хромосому. В зависимости от штамма агробактерии длина Т-фрагмента варьирует от 12 до 24 т. п. н. [4]. Под влиянием генов Т-фрагмента трансформированные растительные клетки начинают активно делиться и формируют корончатый галл вследствие нарушения баланса фитогормонов, от которого зависит нормальный морфогенез растения. В клетках корончатого галла начинают экспрессию гены Т-фрагмента, детерминирующие синтез несвойственных растениям соединений, названных опинами. Опины, выделяемые клетками опухоли растения, в качестве источников углерода и азота могут использоваться только тем штаммом бактерии *A. tumefaciens*, который инфицировал растение. Таким образом, в процессе эволюции сформировался механизм превращения растительной клетки в «фабрику» по производству веществ исключительно для нужд *A. tumefaciens*. По сути, самой природой был представлен эксперимент по генетической инженерии, механизм которого удалось установить лишь в 1977 г. М. Чилтон с сотрудниками. В 1978 г. Дж. Шелл показал, что Ti-плазмиду можно использовать как переносчик любых чужеродных генов. В настоящее время в качестве векторов для трансформации растений используют модифицированную Ti-плазмиду и сконструированные векторные системы нового типа на ее основе. Интересующий исследователя ген встраивают в область Т-фрагмента.

Наряду с Ti-плазмидой в генетической инженерии используются векторы на основе Ri-плазмид, которые выделены из агробактерии *Agrobacterium rhizogenes* (по реклассификации *Rhizobium rhizogenes* [3]). Ri-плазмиды вызывают усиленное избыточное образование корней и так же, как Ti-плазмиды, приводят к синтезу опинов. Преимущество Ri-плазмид состоит в их неонкогенности, что позволяет регенерировать из трансформированных ею клеток здоровые растения. Кроме того, Ri-плазмида может принести пользу растению, способствуя корнеобразованию. Так, трансформированный Ri-плазмидой картофель отличается большей развитостью корневой системы, засухоустойчивостью и повышенной урожайностью.

Потребность в создании эффективных векторных систем для трансгенеза растительных клеток побудила исследователей к поиску новых источников, в частности среди фитовирусов. ДНК-содержащие вирусы растений имеют малый размер генома, что позволяет легко манипулировать вирусной ДНК, обладают высокой копийностью вирусной ДНК в клетках зараженных растений, а также имеют сильные промоторы, которые могут обеспечить эффективную экспрессию чужеродных генов. В генетической инженерии растений наиболее перспективным в качестве вектора считается вирус мозаики цветной капусты, поражающий в основном растения семейства крестоцветных.

Включенный в ДНК вектора интересующий исследователя ген должен быть доставлен в реципиентную клетку растения. В условиях in vivo чужеродная ДНК может неполовым путем в процессе трансформации быть перенесена от клеток донора к клеткам реципиента, в результате чего реципиентные клетки приобретают новые или усиленные наследственные свойства и признаки, как это было показано с *A. tumefaciens*. В условиях лабораторного эксперимента методы трансформации растительных клеток различаются в зависимости от трансформируемого объекта (однодольные или двудольные растения). Наиболее предпочтительными для доставки чужеродного гена в клетки растений является метод кокультивирования с агробактерией и метод биобаллистической трансформации.

Метод кокультивирования с агробактерией основан на трансформации клеток растений агробактериями, обладающими природной способностью доставлять интересующий ген в составе плазмидного вектора в растительный геном. Популярность этого метода связана с относительной простотой проведения трансформации и довольно высоким выходом трансгенных растений от 10 до 60 % в зависимости от вида. Методом кокультивации с агробактерией к настоящему времени получены трансгенные растения практически у всех сельскохозяйственных двудольных растений. Адаптирован этот метод и для некоторых однодольных растений, таких как пшеница, кукуруза, рис.

Метод биобаллистической трансформации основан на бомбардировке микрочастицами из золота, вольфрама и платины с напыленными векторными ДНК культивируемых на питательной среде клеток растений. Попав в клетку, ДНК, покрывающая частицы, интегрируется в растительную ДНК. Этот метод применим для трансформации широкого круга растений, как однодольных, так и двудольных, прост в применении. Сегодня используется очень широко, в том числе и для транспортировки генов в хлоропласты и митохондрии.

Существенным моментом в технологии получения трансгенных растений является этап регенерации жизнеспособных взрослых растений из трансформированных клеток, основанной на свойстве тотипотентности. Тотипотентность – свойство соматических клеток растений полностью реализовать свою наследственную программу онтогенетического развития при определенных условиях выращивания вплоть до образования взрослых растений и семян. Таким образом, из клеток, сконструированных генно-инженерными методами, можно получить трансгенные растения, все клетки которых будут содержать чужеродный ген. Новый признак, контролируемый чужеродным геном, будет передаваться последующим поколениям при семенном размножении.

Отбор трансгенных растений осуществляется на основе вводимых вместе с целевым геном селективных маркеров, представляющих собой репортерные гены, которые позволяют либо проводить отбор трансформированных клеток, либо оценивать активность кодируемых ими ферментов. Разработаны методы, позволяющие после отбора трансгенных растений удалять из них при скрещивании маркерный ген.

Краткий обзор основных этапов технологии создания трансгенных растений приведен с целью демонстрации сложности и трудоемкости перевода какого-либо сорта растения в статус трансгенного, а также необходим для осознанного понимания потенциальных рисков введения генетически модифицированных сельскохозяйственных культур в агроценозы для здоровья как человека, так и окружающей среды. Стратегия создания растений, устойчивых к абиотическим стрессам, основана на исследованиях сложных молекулярных механизмов ответа на солевой стресс. Так, устойчивость к засолению обусловливает необходимость адаптации сразу к трем независимым стрессовым факторам [5]. Осмотический стресс приводит к нарушению гомеостаза и ионного транспорта в клетках [6]. Окислительный стресс, который часто сопровождает как солевой, так и другие стрессы (высокую температуру, воздействие засухи), может приводить к денатурации структурных и ферментативных белков [5]. Токсическое действие засоления связано с включением активных ионов в метаболизм клетки и целого растения.

Высшие растения имеют механизмы защиты от воздействия стрессового фактора на уровне интактного растения и на клеточном уровне. Стрессовый фактор активирует включение в клетке ответных реакций, связанных с синтезом стрессовых белков, участвующих в передаче сигнала, и антиоксидантов, нейтрализующих свободные радикалы, а также с накоплением осмопротекторов, способных создавать градиент для поглощения воды. Поскольку адаптивные реакции растений на стресс контролируются многими генами, а возможности генно-инженерных методов сегодня основываются на переносе

одного или нескольких генов, то конструирование трансгенных растений, устойчивых к стрессовому фактору, является довольно сложной задачей.

Исследования геномов модельного объекта *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. и других растений позволили идентифицировать большое число транскрипционных факторов, которые в ответ на стрессовый фактор запускают транскрипцию генов, повышающих толерантность к высокому содержанию соли. Трансформация такого стресс-индуцибельного гена приводила к избыточной экспрессии ряда подконтрольных генов, обеспечивающих стрессоустойчивость трансгенных растений, при этом наблюдался негативный эффект, связанный с замедлением их роста.

Исследования устойчивых и чувствительных к хлориду натрия сортов, а также галофитов позволили установить, что наибольшие различия между ними наблюдаются в экспрессии генов Na+/H+ антипортеров, играющих решающую роль в поддержании ионного гомеостаза клетки, позволяя выжить растению в условиях засоления. Продемонстрирована повышенная устойчивость к засолению у растений картофеля, трансформированных геном Na+/H+ антипортера ячменя [7]. Рациональное применение таких генов для трансгенеза может быть перспективным для получения дополнительной устойчивости растений к солевому стрессу в полевых условиях [5].

При отсутствии у растений эволюционно сложившегося механизма солеустойчивости адаптация идет за счет эффективного механизма засухоустойчивости, важным критерием которого (как и солеустойчивости) служит способность к осморегуляции. В ответ на осмотический стресс в растениях накапливаются осмолиты (аминокислоты, четвертичные ионы, сахароспирты, углеводы), механизмом действия которых является установление осмотического баланса между клеткой и окружающей средой. Сходные биохимические пути синтеза осмопротекторов, обнаруженные у бактерий и высших растений, позволили использовать гены бактериального происхождения для создания трансгенных растений, толерантных к солевому стрессу [8].

Ряд практических наработок связан с поиском специфических генов, работа которых индуцируется стрессовым фактором и приводит к повышенному синтезу и накоплению ферментов, нейтрализующих образовавшиеся токсичные соединения, например свободные радикалы, активные формы кислорода, тем самым обеспечивается устойчивость растений к негативному фактору. Положительные результаты экспериментов по трансгенезу в *Nicotiana tabacum* L., *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. защитных генов, выделенных как из высших растений, так и одноклеточных зеленых водорослей, свидетельствуют о перспективности уменьшения негативного действия окислительных токсикантов для получения трансгенных растений с толерантностью ко многим стрессам.

Заключение

Таким образом, несмотря на достигнутые результаты в различных подходах по созданию новых форм растений, устойчивых к абиотическим стрессам, с помощью генно-инженерных методов, говорить сегодня о реальной возможности решения данной задачи не приходится. Лимитирующим фактором выступает полигенный контроль формирования ответной реакции и адаптации растений к абиотическому стрессу. Плейотропный эффект встраиваемых генов может вызывать замедление роста растений и тем самым сказаться на их продуктивности. Экспрессия чужеродных генов в трансгенных растениях часто оказывается нестабильной, поскольку зависит от природы гена, места его интеграции в геноме растения, количества копий и других факторов. Кроме того, большинство исследований, связанных с разработкой и применением трансгенеза, как правило, выполнены на модельных растительных объектах. Результаты при использовании сельскохозяйственных культур, как правило, достигнуты в лаборатории и не прошли

апробации в полевых условиях. Полевые испытания ограничиваются возможной опасностью, связанной с неконтролируемым переносом трансгена при опылении в биоценозы, а потому являются отдаленной перспективой. Несомненно, что в повышении устойчивости растений к абиотическим факторам по-прежнему большое значение будут иметь методы традиционной адаптивной селекции, а также применение регуляторов роста растений, которые не только усиливают ростовые процессы, но и повышают стрессоустойчивость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мороз, Г. Об учете агроклиматических условий Беларуси и их динамики при оценке сельскохозяйственных земель / Г. Мороз // Земля Беларуси. – 2017. – № 4. – С. 23–27.

2. Мельник, И. В. Изменение климата и водных ресурсов на территории Полесья / В. И. Мельник // Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 14–17 сент. 2016 г. : в 2 т. / Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2016. – Т. 1. – С. 399–403.

3. A revision of Rhizobium Frank 1889, with an emended description of the genus, and the inclusion of all species of Agrobacterium Conn 1942 and Allorhizobium undicola de Lajudie et al. 1998 as new combinations: *Rhizobium radiobacter*, *R. rhizogenes*, *R. rubi*, *R. undicola* and *R. vitis* / J. M. Young [et al.] // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. – 2001. – Vol. 51. – P. 89–103.

4. Kausch, A. P. GMOs and Food Safety What Are You Eating? [Electronic resource] / A. P. Kausch. – Mode of access: https://docplayer.net/58979015-Gmos-and-food-safety-what-are-you-eating-dr-albert-kausch-september-15-2014.html.

5. Глик, Б. Молекулярная биология. Принципы и применение : пер. с англ. / Б. Глик, Дж. Пастернак. – М. : Мир, 2002. – 589 с.

6. Генно-инженерный подход к повышению устойчивости растений к засолению: проблемы и перспективы / Е. Н. Баранова [и др.] // Проблемы агробиотехнологии : сб. / под ред. П. Н. Харченко. – М., 2012. – С. 49–68.

7. Zhu, J. K. Salt and droughy stress signal transduction in plant / J. K. Zhu // Annual Review of Plant Biology. – 2002. – Vol. 53. – P. 247–273.

8. Повышенная устойчивость к засолению растений картофеля, трансформированных геном вакуолярного Na+/H+ антипортера ячменя HVNHX2 / Ф. Баят [и др.] // Физиология растений. – 2010. – Т. 57. – С. 744–755.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 29.05.2019

Lenivko S. M. **Genetic Engineering Approach in Creating New Forms of Plants Resistant to Abiotic Factors**

The article discusses the genetic engineering strategy for creating new plant forms resistant to abiotic factors, aimed at reducing climate risks in crop production. An overview of the main stages of the technology of creating transgenic plants is presented, which makes it possible to realize not only the complexity and laboriousness of the transgenesis process, but also an understanding of the potential risks of introducing genetically modified crops into agrocenoses.

УДК 581.811

Н. М. Матусевич[1], М. П. Жигар[2]
[1]канд. биол. наук, доц. каф. ботаники и экологии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
[2]канд. биол. наук, проф. каф. ботаники и экологии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: botany@brsu.bresy.by

ЗАЛОЖЕНИЕ ФЕЛЛОГЕНА И ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРИДЕРМЫ У НЕКОТОРЫХ РОЗОЦВЕТНЫХ

Описано заложение феллогена и перидермы в тканях коры однолетнего стебля у видов древесных растений семейства Rosaceae Juss.: *спирея Ван-Гутта – Spiraea vanhouttei* (Briot) Zab. *(подсемейство Спирейные, Spiraeoideae), вишня обыкновенная – Cerasus vulgaris* Mill., *черешня – Cerasus avium* (L.) Moench. *(подсемейство Сливовые, Prunoideae), яблоня домашняя – Malus domestica* L., *груша обыкновенная – Pyrus communis* L. *(подсемейство Яблоневые, Maloideae). Отмечено, что его образование происходит в разных тканях коры и в разные сроки.*

Введение

Систематическое изучение ткани перидермы началось после публикации Х. Моля [1]. К. Фрич [2] при описании анатомического строения вегетативных органов кратко касался некоторых вопросов перидермообразования. Х. Дулио изучил строение пробки у большого числа видов (около 450), рассмотрел места заложения перидермы, степень развития феллемы, изменения в коре у растений в связи с глубоким заложением перидермы [3]. Описано также строение и развитие в онтогенезе этой ткани у некоторых Розоцветных [4].

Выявлено, что время образования феллогена у разных видов различно и в зависимости от условий обитания может быть неодинаковым даже у особей одного вида [5]. У большинства деревьев перидерма возникает в первый год жизни; у тиса, некоторых видов миндаля, клена американского она образуется на второй год [6–8]. Раннее заложение феллогена у большинства видов *Armeniaca*, наряду с другими признаками, объясняет высокую засухоустойчивость и морозоустойчивость его видов [9; 10], однако у *Armeniaca mume* образование перидермы позднее [10]. Разное время заложения феллогена отмечено у видов *Rubus*, когда у 3 из 8 исследованных видов к июню этот слой еще не сформировался [11]. У изученных видов боярышника феллоген закладывается в мае, у видов секции *Sanguineae* – во второй половине апреля [7].

В. М. Еремин и Ю. Ф. Рой показали, что образование перидермы происходит очень рано – спустя 2–3 недели после начала роста стебля [12; 13]. У большинства деревьев, как отмечают другие авторы, образование перидермы начинается в июне и первой половине июля [14]. Указывается, что феллоген некоторых побегов закладывается неодновременно по окружности стебля, и тогда половина его поверхности была с феллогеном, а другая – без него, или половина стебля имела два слоя клеток пробки, а другая – только один. Эту особенность автор объясняет неодинаковой освещенностью сторон побега [16]. Л. В. Наумова выявила, что у бархата амурского феллоген формируется раньше на стороне стебля, обращенной к югу [17].

Причины возникновения перидермы у деревьев и кустарников имеют разное объяснение. Г. Габерландт выдвинул теорию, согласно которой феллоген возникает под влиянием некрогормонов, образующихся в результате отмирания клеток эпидермы

или волосков [18]. П. М. Жуковский связывает образование перидермы с отмиранием эпидермы [19]. Формирование феллогена объясняют также подготовкой растения к зимним условиям, резким повышением температуры воздуха и продолжительности солнечного освещения, а значит, увеличением испарения, что вызывает образование перидермы как защиты от испарения. Однако никто из ученых не не объясняет причины столь раннего формирования перидермы у многих растений. Дальнейшее увеличение числа слоев клеток феллемы в результате деятельности феллогена связывают с похолоданием и возрастающей силой ветра в осенний период, а следовательно, со сложностями в обеспечении растения необходимым количеством воды [14].

У разных видов мощность пробкового слоя неодинаковая [14; 15]. Вследствие неодновременного образования пробки в разных частях побега к концу вегетационного периода образуется феллема, состоящая из различного количества слоев. По данным В. М. Еремина и Ю. Ф. Роя, такое явление характерно не для всех растений, например, у акации белой авторы отмечают одинаковое количество слоев пробки в перидерме нижних и верхних междоузлий [20]. Выявлено также, что у эндемичных видов пробка развита слабее [21].

Перидерма образуется вторичной меристемой – феллогеном. Х. Дулио выявил пять случаев его образования путем деления из: 1) эпидермы, 2) субэпидермального слоя, 3) других клеток коры (до эндодермы), 4) эндодермы, 5) перицикла [3]. Наиболее частым у покрытосеменных является образование феллогена из субэпидермального слоя, что автор выявил у растений 52 семейств, причем у 20 семейств он является единственным. У видов 22 семейств Х. Дулио наблюдал случаи эпидермального образования феллогена. Перидерма перициклического происхождения выявлена им у представителей 20 семейств.

К. Эзау [27] отмечает у ивы возникновение феллогена в эпидерме. Однако исследования В. И. Бойко и Н. В. Тарасюк [28] показали, что феллоген у изученных ими трех видов ивы формируется из периферического слоя клеток колленхимы. Субэпидермальное заложение феллогена отмечают также Л. В. Наумова для *Phellodendron amurense* Rupr. [17], Н. М. Жигар для видов *Cerasus* [29]. К. Эзау считает, что такое субэпидермальное заложение феллогена встречается у растений чаще [27]. У некоторых видов феллоген может возникать в первичной коре стебля вблизи проводящей зоны, непосредственно во флоэме [23].

Для сосновых В. М. Еремин называет три способа заложения феллогена: 1) субэпидермальное, 2) субгиподермальное, 3) под воздухоносной тканью листовых подушек [22].

Исследования показали, что место заложения феллогена – устойчивый признак. Он не зависит от условий жизни растения, поэтому его можно рассматривать наряду с другими в качестве диагностического. В своих исследованиях коры однолетнего стебля вересковых В. И. Бойко показал, что у черники обыкновенной феллоген закладывается из клеток протофлоэмы, а у черники кавказской – субэпидермально; у земляничника мелкоплодного феллоген образуется из клеток протофлоэмы и перицикла, а у земляничника крупноплодного – только из протофлоэмы [23].

Как правило, у большинства древесных пород сначала феллоген образует несколько слоев пробки и затем откладывает клетки феллодермы. У амурского бархата, однако, первое отложение клеток феллогеном центростремительное, в результате чего образуется один слой клеток феллодермы. Все последующие деления феллогена центробежные с образованием феллемы [17]. Деление клеток феллогена и образование клеток феллемы

у этого вида продолжаются до августа. Затем клетки феллогена прекращают активную деятельность и до июня следующего года находятся в состоянии покоя. На следующий год клетки феллогена уже двулетнего побега возобновляют свою активность. Они делятся периклинально, образуя один слой клеток феллодермы и 8–12 слоев клеток феллемы. Так происходит из года в год у 3–6-летних побегов *Phellodendron amurense.*

Феллодерма в составе перидермы у растений развита в разной степени. Она может отсутствовать, быть однослойной [24], 2–3–многослойной [25]. По функции эта ткань может быть запасающей, ассимиляционной и механической [26; 27].

Изучение анатомического строения стебля дерева в целом, а также отдельных его тканей, в том числе и перидермы, имеет большое значение, поскольку они оказывают большое влияние на формирование будущего урожая. Исследование древесных растений семейства Розоцветных особенно важно, потому что они в подавляющем большинстве являются плодовыми или декоративными. Вторичная покровная ткань перидерма, входящая в состав коры их стебля, защищает тело растения от испарения, перегрева, переохлаждения, проникновения паразитов и т. п. Кроме того, перидерма выполняет и механическую функцию. Все это свидетельствует о большой биологической роли перидермы в жизни растений, и ее детальное изучение, несомненно, имеет значение для теории и практики растениеводства, а также представляет интерес при оценке взаимоотношений растений со средой в разные сезоны года.

Как показывает анализ литературных данных, строение перидермы, время и место заложения феллогена у разных растений различно. А поскольку формирование защитной перидермы обусловливает подготовку растения к зиме, изучение ее образования особенно важно у плодовых и декоративных растений, имеющих большое значение в садоводстве и озеленении.

Материалы и методы исследования

Материалом для настоящей работы послужили однолетние стебли шести видов плодовых и декоративных растений семейства *Rosaceae* Juss., принадлежащих к разным его подсемействам: пузыреплодник калинолистный – *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim., спирея Ван-Гутта – *Spiraea vanhouttei* (Briot) Zab. (подсемейство Спирейные, *Spiraeoideae*), вишня обыкновенная – *Cerasus vulgaris* Mill., черешня – *Cerasus avium* (L.) Moench. (подсемейство Сливовые, *Prunoideae*), яблоня домашняя – *Malus domestica* L., груша обыкновенная – *Pyrus communis* L. (подсемейство Яблоневые, *Maloideae*). (Латинские названия растений даны по С. К. Черепанову [30]).

Образцы – участки третьего междоузлия однолетнего стебля – брали в трех экземплярах с южной стороны дерева через каждые 10 дней в период с мая по июль (19 мая, 29 мая, 9 июня, 19 июня, 1 июля, 15 июля) и в середине ноября 2018 г. из растений, произрастающих в отделе Агробиология Центра экологии Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина, фиксировали в 96 %-ном спирте и выдерживали в смеси спирта и глицерина (1:1). Из стебля готовили микрообразцы, которые использовали для получения срезов. Их изготавливали на санном микротоме с замораживающим столиком. Срезы толщиной 10–30 мкм выполняли в поперечном направлении. Затем их помещали в сафранин на 20 минут, после чего – в нильский синий на 3 минуты. Далее срезы проводили через серию спиртов разных концентраций (50, 70, 96 %-ный и абсолютный спирт). На следующем этапе их обрабатывали карболксилолом, ксилолом, после чего помещали и канадский бальзам [31].

Анализ исследуемых объектов проводили на световых микроскопах Биолам Р–15, Л–212. Измерения структурных элементов перидермы проводили при помощи винтового окуляр-микрометра МОВ–1–15.

Результаты исследования

Пузыреплодник калинолистный *(Physocarpus opulifolius* (l.) Maxim.) в коре однолетнего стебля, собранного и зафиксированного в мае, содержит эпидерму, первичную кору, первичную флоэму, вторичную флоэму (луб). Уже в средних междоузлиях однолетнего стебля видно, как оболочки клеток первичной флоэмы начинают утолщаться, так что в нижней трети стебля на ее месте образуется большая, до 5 слоев клеток, группа волокон. Затем в нижней трети стебля клетки вторичной флоэмы, лежащие сразу под волокнами, периклинально делятся и образуют феллоген. К 19 мая начало заложения феллогена отмечается в нижних междоузлиях однолетнего стебля.

К середине июня феллоген содержится уже и в средней части стебля, отсутствуя в его верхнем, еще продолжающем рост участке, но уже к середине октября перидерма сформировалась по всему стеблю, составляя в верхней трети 5–6 слоев пробки и 1–2 слоя феллодермы. У пробки, отложенной в летний период, радиальный размер клеток больше тангентального, так что они кажутся слегка вытянутыми в радиальном направлении. Оболочки клеток тонкие, слегка извилистые. К 15 ноября перидерма достигает мощности до 200–205 мкм, в ее составе до 12 слоев клеток пробки, однослойный феллоген, 1–2-слойная феллодерма. Пробка бесцветная, гомогенная, все клетки ее тонкостенные, со слегка извилистыми оболочками. Заложение перидермы в глубоких слоях коры вызывает слущивание внешних, расположенных над перидермой, слоев первичной коры, а также эпидермы.

У спиреи Ван-Гутта (*Spiraea vanhouttei* (Briot.) Zbl.) снаружи однолетний стебель покрыт эпидермой, ниже которой располагается первичная кора, включающая колленхиму, коровую паренхиму и эндодерму – однослойную ткань с сильно утолщенными бесцветными наружными периклинальными клеточными оболочками, с окрашенным на препаратах в коричневый цвет внутренним содержимым [15]. Под эндодермой лежит ткань, которую можно интерпретировать как перицикл. Именно в этой ткани, непосредственно под эндодермой, мы наблюдали 19 мая периклинальные деления клеток, приводящие к возникновению феллогена. И уже к середине июня у спиреи Ван-Гутта феллоген закладывается по всему стеблю.

Феллоген сначала откладывает феллодерму внутрь от себя, а затем феллему кнаружи. И в средних междоузлиях однолетнего стебля 19 июня мы наблюдали 2–3 слоя феллодермы, а пробка еще не была отложена. В нижней трети стебля перидерма состояла уже из одного слоя феллемы, однослойного феллогена и 3–4 слоев феллодермы. В нижних междоузлиях стебля, зафиксированного в ноябре, пробка была двуслойная, феллодерма сложена 3–4 слоями клеток, феллоген однослойный. У клеток пробки наружные стенки сильно утолщены, достигают 3,0 ± 0,5 мкм. Оболочки клеток феллемы неокрашенные, а внутреннее клеточное содержимое коричневого цвета.

После формирования перидермы эпидерма и ткани первичной коры, за исключением эндодермы, слущиваются. Эндодерма занимает самое наружное положение, при этом она обладает некоторым сходством с лежащей глубже феллемой: по окраске содержимого клеток, по утолщенной внешней периклинальной стенке. Можно согласиться с Л. И. Лотовой и А. К. Тимониным, которые рассматривают такую эндодерму как временную покровную ткань после разрушения внешних слоев первичной коры [32].

Кора однолетнего стебля вишни обыкновенной *(Cerasus vulgaris* Mill.) 19 мая состояла из эпидермы, первичной коры (колленхима и коровая паренхима) и луба. Феллогена в ней еще не было. Его возникновение было отмечено к 19 июня из колленхимы в результате периклинального деления ее клеток. Таким образом, феллоген у вишни обыкновенной имеет субэпидермальное происхождение. Он однослойный, клетки его тонкостенные, вытянуты в тангентальном направлении. Сначала феллоген откладывает кнаружи стебля пробку. Эта ткань характеризуется достаточной степенью развития, и число слоев ее клеток достигло к 15 ноября 25–30. Клетки пробки имеют тонкие оболочки, они сильно вытянуты в тангентальном направлении. Их тангентальный размер составляет 30 ± 0,6 мкм, радиальный – 4,0 ± 0,3 мкм. На препаратах в клетках пробки видно наличие ядер и бесцветного внутреннего содержимого. Феллодерма однослойная, ее клетки в поперечном сечении имеют овальную форму.

Кора черешни (*Cerasus avium* (L.) Moench.) имеет сходное строение с корой вишни обыкновенной. 19 мая феллоген у черешни еще отсутствует, он формируется к 19 июня в результате периклинального деления клеток колленхимы. Путем многократных периклинальных делений он отчленяет кнаружи стебля пробку, и только затем вовнутрь формирует феллодерму.

Пробка у черешни к 15 июля насчитывает до 6 слоев тонкостенных, имеющих волнистые очертания клеток. Они сильно вытянуты в горизонтальном направлении. Так, тангентальный размер клеток – 34 ± 0,8 мкм, радиальный размер – 10 ± 0,4 мкм. В клетках просматриваются ядра и светлое внутреннее содержимое. Феллодерма однослойная, сложена клетками овальной формы. К 15 ноября в составе перидермы содержалось 12–14 слоев клеток феллемы.

У яблони домашней (*Malus domestica* L.) в середине июня наблюдаются периклинальные деления в клетках эпидермальной ткани, приводящие к заложению слоя феллогена. Он характеризуется незначительной меристематической активностью и к 1 июля формирует кнаружи от себя 1–2 слоя феллемы, а к 15 ноября в составе феллемы находится 4–5 клеток в одном радиальном ряду.

Клетки пробки мелкие, вытянутые в тангентальном направлении. Их оболочки утолщены неодинаково: более толстой является внешняя периклинальная стенка. Содержимое клеток темно-коричневого цвета. Тангентальный размер клеток феллемы составляет 15,0 ± 0,6 мкм, радиальный –2,5 ± 0,3 мкм. Феллодермы в составе перидермы однолетнего стебля мы не наблюдали.

У груши обыкновенной (*Pyrus communis* L.) феллоген образуется к 19 мая в результате периклинального деления клеток эпидермы. К концу июня клетки эпидермальной ткани начинают отмирать и отшелушиваться. К этому времени феллоген образует 2–3 слоя пробки. Ее клетки имеют прямоугольную форму, вытянутую в тангентальном направлении, тангентальный их размер составляет 15 ± 0,6 мкм, радиальный – 3 ± 0,3 мкм. 15 ноября у груши обыкновенной насчитывалось 5–6 слоев пробки, они имели темноокрашенное внутреннее содержимое, наружные периклинальные стенки их клеток утолщены, стенки клеток не окрашены. Феллодерма в составе перидермы не образуется.

Обсуждение результатов

В результате исследования нами было установлено, что время заложения феллогена у различных видов растений семейства *Rosaceae* Juss. различно. У *Spiraeoideae* (*Physocarpus opulifolius* и *Spiraea vanhouttei*) и у груши обыкновенной (*Pyrus communis*)

из *Maloideae* начало отложения феллогена отмечается во второй половине мая (к 19 мая). У Сливовых (*Prunoideae*) – *Cerasus vulgaris* и *Cerasus avium* – феллоген образуется во второй половине июня (мы его наблюдали 19 июня). В это же время отмечено заложение феллогена у яблони домашней (*Malus domestica*) из подсемейства *Maloideae*.

Различным является и место заложения феллогена в коре. У пузыреплодника калинолистного он образуется в результате периклинального деления клеток вторичной флоэмы. У спиреи Ван-Гутта феллоген возникает из перицикла. У вишни обыкновенной и черешни феллоген имеет субэпидермальное происхождение, он образуется из клеток колленхимы первичной коры. В стебле яблони домашней и груши обыкновенной феллоген формируется в результате периклинального деления клеток эпидермы.

Характер работы феллогена также неодинаков. Так, только у спиреи Ван-Гутта феллоген формирует сначала феллодерму, у других изученных нами видов сперва формируется феллема, а феллодерма образуется позже. У Яблоневых формирование феллодермы в составе перидермы нами не отмечено.

Перидерма у изученных нами видов характеризуется различной мощностью, главным образом в различной степени развития феллемы, которая выполняет основные защитные функции. У пузыреплодника калинолистного в середине ноября насчитывалось до 12 слоев клеток пробки, у спиреи Ван-Гутта – 2 слоя, у вишни обыкновенной – 25–30 слоев, у черешни – 10–12 слоев, у яблони домашней – 4–6 слоев, у груши обыкновенной – 5–6 слоев клеток пробки.

Феллодерма отличается также различной степенью развития. Она может быть однослойной (у вишни обыкновенной и черешни), состоять из 1–2 слоев клеток (у пузыреплодника калинолистного), иметь в своем составе 3–4 слоя клеток (у спиреи Ван-Гутта). У яблони домашней и груши обыкновенной феллодерма в составе перидермы однолетнего стебля не формируется.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohl, H. Untersuchungen über die Entwicklung des Korkes und Borke auf der Rinde der baumartigen Dicotylen / H. Mohl. – Berlin, 1836. – S. 212–228.

2. Fritsch, C. Anatomisch-systematische Studien über Rubus / C. Fritsch // Sitzber. Kaiser. Akad. Wissensch. – 1887. – Bd. XXXV. – S. 1–28.

3. Douliot, H. Recherches sur le periderme / H. Douliot. – Ann. Sci. Nat. Bot. – 1889. – Vol. 10, № 2. – P. 325–395.

4. Mylius, G. Das Polyderm. Eine vergleichende Untersuchung über die physiologischen Schneiden: Polyderm, Periderm und Endodermis / G. Mylius. – Biblioth. Bot., 1913. – № 18 (79). – S. 1–119.

5. Спесивцева, В. И. Влияние метеорологических условий на развитие тканей коры у сеянцев древесных растений / В. И. Спесивцева, П. Б. Раскатов // Материалы I Всесоюз. совещ. по экол. анатомии растений. – Ташкент, 1986. – С. 151.

6. Еремин, В. М. Перидерма сосновых / В. М. Еремин ; Брест. ун-т. – Брест, 1983. – 15 с. – Деп. в ВИНИТИ 15.11.83, № 6081-83.

7. Быкова, Н. Б. Сравнительно-анатомическое изучение структуры однолетних побегов некоторых видов Crataegus L. / Н. Б. Быкова, Фам Ван Нанг // Узб. ботан. журн. – 1976. – № 5. – С. 40–44.

8. Шик, А. С. Сравнительно-анатомический анализ однолетних стеблей двух кленов / А. С. Шик, В. М. Еремин ; Брест. ун-т. – Брест, 1990. – 10 с. – Деп. в ВИНИТИ 17.05.90, № 2684-В 90.

9. Гзырян, М. Строение коры и древесины абрикоса (материалы к анатомо-физиологическому изучению плодовых Армении) / М. Гзырян // Изв. АН Арм. ССР. – 1952. – Т. 5, № 8. – С. 71–81.

10. Соколова, Е. А. Значение анатомических признаков для систематики и филогении рода Armeniaca Scop. (Rosaceae) / Е. А. Соколова // Филогения и систематика растений : материалы 8 Моск. совещ. по филогении растений. – М., 1991. – С. 105–106.

11. Кормановская, В. В. Сравнительная анатомическая характеристика однолетних побегов видов рода Rubus L. / В. В. Кормановская // Науч.-техн. бюл. ВНИИ растениеводства. – 1994. – № 5. – С. 73–75.

12. Еремин, В. М. Развитие структуры однолетнего стебля некоторых древесных покрытосеменных / В. М. Еремин, Ю. Ф. Рой ; Брест. ун-т. – Брест, 1992. – 15 с. – Деп. в ВИНИТИ 14.04.92, № 1276-В92.

13. Еремин, В. М. Сезонная динамика структуры однолетнего стебля взрослых деревьев / В. М. Еремин, Ю. Ф. Рой // Сб. науч. тр. фак. естествознания. Сер. биология. – Брест, 1993. – С. 16–19.

14. Шамбетов, С. Ш. Перидерма коры стеблей. Современное состояние сведений об этой ткани / С. Ш. Шамбетов // Изв. АН Кирг. ССР. Сер. биол. науки. – 1960. – Т. 2, вып. 3. – С. 91–120.

15. Матусевич, Н. М. Таксономический анализ древесных представителей семейства Rosaceae по признакам анатомической структуры коры их однолетних стеблей : дис. … канд. биол. наук : 03.00.05 / Н. М. Матусевич. – Брест, 2005. – 99 с.

16. Блукет, Н. А. О возникновении пробковой ткани у деревьев и кустарников / Н. А. Блукет // Докл. ТСХА, 1958. – Вып. 36. – С. 308–313.

17. Наумова, Л. В. Ультраструктура клеток перидермы Phellodendron amurense Rupr. : автореф. дис. … канд. биол. наук : 03.00.05 / Л. В. Наумова. – Ленингр. ботан. ин-т. – Л., 1986. – 26 с.

18. Haberlandt, G. Zur Entwicklungsphysiologie des Periderms / G. Haberlandt // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. – 1928. – Bd. 23. – S. 317–338.

19. Жуковский, П. М. Ботаника : учеб. пособие / П. М. Жуковский. – М. : Высш. шк., 1964. – 667 с.

20. Еремин, В. М. Строение и развитие однолетнего стебля белой акации / В. М. Еремин, Ю. Ф. Рой ; Брест. ун-т. – Брест, 1993. – 13 с. – Деп. в ВИНИТИ 05.05.93, № 3602-В96 // РЖ: 04. Биология, 04В Ботаника. – 1993. – № 8. – 8В1079ДЕП.

21. Фурст, Г. Г. Структура стебля однолетних побегов эндемичных видов растений семейства Rosaceae в Москве / Г. Г. Фурст // Роль интродукции в сохранении генофонда редких и исчезающих видов растений. – М., 1984. – С. 141–164.

22. Еремин, В. М. Особенности анатомического строения коры различных форм Picea excelsa L. / В. М. Еремин // Лесной журн. – 1977. – № 5. – С. 5–10.

23. Бойко, В. И. Анатомическое строение коры видов семейства Ericaceae D.C. : дис. … канд. биол. наук : 03.00.05 / В. И. Бойко. – Воронеж, 1996. – 237 л.

24. Ашуров, А. А. Анатомические исследования однолетних побегов некоторых дикорастущих плодовых Таджикистана / А. А. Ашуров // Изв. АН Таджик. ССР. Сер. биол. наук. – 1966. – Вып. 22, № 1. – С. 17–32.

25. Лотова, Л. И. Анатомия коры буковых (Fagaceae) и ее таксономическое значение / Л. И. Лотова, А. К. Тимонин // Ботан. журн. – 1996. – Т. 81, № 2. – С. 60–74.

26. Лотова, Л. И. Морфология и анатомия высших растений / Л. И. Лотова. – М. : Эдиторал УРСС, 2001. – 528 с.

27. Эзау, К. Анатомия семенных растений : в 2 кн. / К. Эзау. – М. : Мир, 1980. – Кн. 1. – 218 с.

28. Бойко, В. И. Анатомия коры некоторых видов ив / В. И. Бойко, Н. В. Тарасюк. – Брест, 1997. – 12 с. – Деп. в ВИНИТИ 01.04.97, № 1030-В97.

29. Жигар, Н. М. Перидерма некоторых видов сливовых / Н. М. Жигар. – Брест, 1997. – 8 с. – Деп. в ВИНИТИ 01.04.97, № 1025-В97.

30. Черепанов, С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств / С. К. Черепанов. – СПб. : Мир и семья, 1995. – 990 с.

31. Прозина, М. Н. Ботаническая микротехника / М. Н. Прозина. – М. : Высш. шк., 1960. – 206 с.

32. Lotova, L. I. Anatomy of cortex and secondary phloem of Rosaceae. I. Spiraeoideae – Spiraeeae / L. I. Lotova, A. C. Timonin // Ботан. журн. – 1998. – Т. 83, № 8. – С. 16–27.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 08.10.2019

Matusevich N. M., Zigar M. P. **Phellogen Laying and Peridermal Formation in Some Rosaceae**

The work describes the laying of the phellogen and periderm in the tissues of the bark of an annual stem in species of woody plants of the Rosaceae Juss family.: Spiraea Van-Gutta – Spiraea vanhouttei (Briot) Zab. (subfamily Spiraea, Spiraeoideae), common cherry – Cerasus vulgaris Mill., sweet cherry – Cerasus avium (L.) Moench. (Plum subfamily, Prunoideae), domestic apple tree – Malus domestica L., common pear – Pyrus communis L. (Apple subfamily, Maloideae) It was noted that its formation occurs in different tissues of the cortex and at different times.

УДК 612.176

Н. К. Саваневский[1], Г. Е. Хомич[2]
[1, 2]канд. биол. наук, доц. каф. анатомии, физиологии и безопасности человека
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: medicine@brsu.brest.by

АНАЛИЗ МЕДЛЕННОВОЛНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

Представлен обзор литературы, посвященной исследованию низкочастотных колебаний параметров функционирования сердечно-сосудистой системы. Приводятся результаты собственных исследований авторов, свидетельствующие о наличии трех типов медленноволновых колебаний тонуса мелких кровеносных сосудов ног у девушек, находящихся в состоянии покоя.

Введение

Обзор литературы. При анализе состояния здоровья человека определяющее значение имеет исследование и оценка функционирования сердечно-сосудистой системы. Анализ медленноволновых колебаний показателей кровообращения является актуальным направлением научных исследований современной интегративной физиологии, позволяющим изучать активность нервных и гуморальных механизмов регуляции. Одними из первых начали исследоваться изменения колебаний частоты сердечных сокращений (ЧСС), что обусловлено достаточно легкой возможностью его регистрации с помощью электрокардиографии.

Диагностика состояния и резервных возможностей сердца с привлечением различных спектральных методов анализа межсистолических интервалов R–R начала использоваться с 60-х гг. прошлого века [1; 2]. Была выдвинута гипотеза о связи колебательных процессов в организме с деятельностью различных уровней системы управления физиологическими функциями [3].

Наиболее широко известны колебания ЧСС в зависимости от фазы дыхания. Однако дыхательная аритмия не является единственной причиной колебаний ЧСС. Были обнаружены колебания ЧСС с периодами 10 и 15–20 с, а также с еще большими периодами – до 60–80 с, которые назвали медленными волнами [4]. С помощью информационного компьютерного подхода удалось выявить колебания ЧСС с периодами от 36–150 с до 17–50 мин. [5]. По-видимому, наиболее медленные колебания ЧСС определяются какими-то эндокринными и метаболическими процессами [6; 7]. По принятым стандартам, медленноволновые колебания физиологических параметров от 0,04 до 0,003 Гц получили название очень низкочастотных составляющих (Very Low Frequency – VLF). Более быстрые низкочастотные составляющие (Low Frequency – LF) обусловлены медленными колебаниями периодичностью от 0,15 до 0,04 Гц. В литературе их называют среднечастотными [8–10]. Наиболее быстрые высокочастотные составляющие (High Frequency – HF) формируются дыхательными волнами в диапазоне 0,15–0,45 Гц.

Природа LF компоненты, по мнению одних авторов, служит маркером симпатических влияний [10; 11], по мнению других [12], она обеспечивается влиянием как симпатических, так и вагальных механизмов барорефлекторной регуляции ритма сердца. Физиологическая природа VLF-компоненты наименее изучена. Существует мнение [13],

что мощность VLF в диапазоне до 0,01 Гц отражает степень активности церебральных эрготропных систем.

Исследования вариабельности сердечного ритма были начаты в космической медицине [14–16], а затем продолжены в клинической практике [17–20] и при различных физиологических условиях работы сердца [21–34]. К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал об изменении вариабельности кардиоритма у больных, а также у здоровых людей в состоянии покоя и под влиянием физической нагрузки. В меньшей степени изучен вопрос о медленноволновых колебаниях остальных параметров гемодинамики, в частности ударного объема крови, артериального давления, тонуса кровеносных сосудов в состоянии относительного покоя и их изменения под воздействием физических нагрузок.

Тем не менее проведено большое количество исследований, посвященных изучению медленноволновых колебаний артериального давления [35–39], ударного и минутного объема крови [40–42], других параметров гемодинамики [43–45]. Вместе с тем не удалось обнаружить сведений о возможной зависимости медленноволновых колебаний показателей гемодинамики от фонового тонуса кровеносных сосудов, что и явилось задачей данной работы.

Объект и методика исследований

Низкочастотные колебания тонуса микрососудов нижних коненостей у девушек-студенток производилась с помощью неинвазивной биоимпедансной методики по А. А. Астахову [46] на полифункциональном мониторе кровенаполнения «Кентавр». Электроды накладывались на спину, грудь, плечевые и бедренные отделы конечностей, на голень и большой палец правой ноги. Электрическое сопротивление, или импеданс, тканей между электродами измерялось с помощью реографа Р4-02. С четырех каналов реографа сигналы поступали в монитор кровенаполнения «Кентавр», где производилась их компьютерная обработка. С каждым ударом пульса монитор измерял амплитуду реоволны большого пальца ноги (АРП), по величине которой судили о тонусе мелких кровеносных сосудов (микрососудов) нижних конечностей.

Исследование проведено на здоровых девушках в возрасте 20 лет, некоторые из них на момент обследования имели высокий (1-я группа испытуемых), а другие низкий тонус (2-я группа испытуемых) мелких кровеносных сосудов нижних конечностей. Регистрация данных мониторинга производилась в режиме реального времени в течение 10 минут в горизонтальном положении обследуемой девушки.

Определение исходного тонуса микрососудов нижних конечностей для отбора в соответствующую исследуемую группу осуществляли по показателям АРП. При нормальном тонусе и, соответственно, диаметре кровеносных сосудов у взрослого человека АРП составляет 80–150 мОм. В случае вазодилатации и гипотонии АРП равняется 160 мОм и более. При высоком тонусе и сужении сосудов величины АРП падают ниже 30 мОм [46; 47].

Результаты исследований и их обсуждение

Было установлено, что медленноволновые колебания тонуса мелких кровеносных сосудов наблюдаются у девушек с фоновым как высоким, так и с низким тонусом микрососудов, о чем судили по изменениям величины АРП. На рисунке представлены низкочастотные колебания АРП у одной из девушек с высоким фоновым тонусом микрососудов (верхний график) и у студентки с низким тонусом этих же сосудов (нижний график).

по оси ординат – значения АРП, мОм; по оси абсцисс – сокращения сердца

Рисунок. – Колебания тонуса микрососудов по показателям АРП у девушки с высоким тонусом (верхний рисунок) и с низким тонусом (нижний рисунок)

Средняя величина АРП у девушки с фоновым высоким тонусом микрососудов ног за 10-минутный отрезок регистрации с каждым ударом пульса в состоянии покоя в горизонтальном положении составила 18,15 ± 0,1 мОм, что свидетельствует о достаточно большой вазоконстрикции. У девушки с фоновым низким тонусом мелких кровеносных сосудов нижних конечностей средняя величина АРП за такой же промежуток времени равнялась 167,6 ± 0,93 мОм. Несмотря на принципиальные различия в исходном тонусе микрососудов, у обеих девушек наблюдались схожие медленноволновые колебания тонуса сосудов.

На графиках видны колебания АРП, свидетельствующие об изменениях тонуса мелких кровеносных сосудов нижних конечностей. По частоте эти колебания можно разделить по меньшей мере на три типа. Колебания первого типа (рисунок) вызываются растяжением сосудов систолическими объемами крови, выбрасываемой левым желудочком сердца при его сокращениях. Эти наиболее частые колебания совпадают с ритмом сердца и имеют частоту 0,8–1 Гц. Поскольку у здоровых испытуемых девушек 1-й и 2-й групп в состоянии покоя в положении лежа ЧСС составляла 60–75 сокращений в минуту, то не было выявлено значимых различий в частоте колебаний 1-го типа между девушками из обеих групп.

Также у девушек и с высоким и с низким фоновым тонусом микрососудов ног был обнаружен 2-й тип колебаний, который осуществлялся с более редкой частотой. В отношении этого типа колебаний следует отметить, что у девушек с низким тонусом сосудов они были выражены более четко и имели меньшую вариабельность от колебания к колебанию. У конкретной испытуемой (рисунок, нижний график) частота 2-го типа колебаний составляла 0,02–0,04 Гц.

У девушки с высоким фоновым тонусом мелких кровеносных сосудов нижних конечностей (рисунок, верхний график) колебания 2-го типа были менее наглядны и имели достаточно большую вариабельность и частоту. В данном случае частота этих колебаний находилась в диапазоне 0,08–0,12 Гц.

Причиной формирования медленных волн 2-го типа, в соответствии с данными литературы [10–12], можно предположить наличие колебаний симпатических и вагальных механизмов регуляции ритма сердца и тонуса сосудов

У испытуемых из обеих групп наблюдался наиболее редкий 3-й тип медленноволновых изменений тонуса микрососудов. Эти колебания, как и волны 2-го типа, были более регулярны, выражены и менее вариабельны по частоте у студенток с фоновым низким тонусом мелких кровеносных сосудов нижних конечностей. Так, у девушки с низким тонусом сосудов (рисунок, нижний график) колебания 3-го типа длились от 2,5 до 3 мин. Их частота составляла примерно 0,005 Гц.

У студентки с высоким фоновым тонусом микрососудов ног (рисунок, верхний график) колебания 3-го типа существенно различались по своей продолжительности и были менее заметны. Их частота колебалась от 0,005 до 0,001 Гц. Природа низкочастотных колебаний 3-го типа, по-видимому, обусловлена теми же причинами, что и медленноволновые изменения ЧСС [6; 7], артериального давления [36–37], и определяется колебаниями активности метаболических и гуморальных факторов.

Заключение

В состоянии покоя в положении лежа у девушек, имеющих фоновый низкий или высокий тонус мелких кровеносных сосудов нижних конечностей, обнаруживаются три типа медленноволновых изменений тонуса микрососудов ног. Первый тип колебаний

вызывается выбросом систолических объемов крови в кровеносные сосуды. Второй и третий типы колебаний с частотой от 0,001 до 0,12 Гц обусловлены, по-видимому, влияниями на тонус микрососудов ног со стороны эндокринной и дыхательной систем, а также изменениями обмена веществ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование резонансных характеристик сердечно-сосудистой системы / Е. Г. Ващилло [и др.] // Физиология человека. – 1983. – № 2. – С. 257–265.
2. Вегетативные расстройства: Клиника, лечение, диагностика / под ред. А. М. Вейна. – М. : Медицина, 2000. – 752 с.
3. Баевский, Р. М. Некоторые аспекты системного подхода к анализу временной организации функции в живом организме / Р. М. Баевский, М. К. Чернышов // Теоретические и прикладные аспекты временной организации биосистем : сборник. – М. : Наука, 1976. – С. 174–186.
4. Fleisch, F. Die raschen Schwargungen der Pulsfrequenz registriert mit dem Pulszeitschreiber / F. Fleisch, P. Beckmann // Zeitschr. ges exp. Med. – 1932. – № 8. – С. 487–510.
5. Никулина, Г. А. К вопросу о «медленных» ритмах сердца / Г. А. Никулина // Математические методы анализа сердечного ритма. – М : Наука, 1968. – С. 114–126.
6. Баевский Р. М. Спектральный анализ функции сердечного автоматизма / Р. М. Баевский, И. Г. Нидеккер // Статистическая электрофизиология. – Вильнюс, 1968. – 351 с.
7. Флейшман, А. Н. Медленные колебания гемодинамики / А. Н. Флейшман. – Новосибирск : Наука, 1998. – 274 с.
8. Астахов, А. А. Медленноволновые процессы гемодинамики / А. А. Астахов // Инжиниринг в медицине. Колебательные процессы гемодинамики. Пульсация и флюктуация сердечно-сосудистой системы : сб. науч. тр. II науч.-практ. конф. и I Всерос. симп. – Челябинск : АТМН, 2000. – С. 50–63.
9. Информационный подход. Проблемы и перспективы российского образования и здравостроения / А. П. Исаев [и др.] // Валеология. – 2000. – № 4. – С. 4–8.
10. Хаютин, В. М. Спектральный анализ колебаний ЧСС – известное, спорное, неизвестное / В. М. Хаютин, Е. В. Лукошкова // Инжиниринг в медицине. Колебательные процессы гемодинамики. Пульсация и флюктуация сердечно-сосудистой системы : сб. науч. тр. II науч.-практ. конф. и I Всерос. симп. – Челябинск : АТМН, 2000. – С. 71–80.
11. Хаютин, В. М. Сосудисто-двигательные рефлексы / В. М. Хаютин. – М. : Наука, 1984. – 376 с.
12. Исаев, А. П. Функциональные критерии гемодинамики в системе тренировки спортсменов (индивидуализация, отбор, управление) : учеб. пособие / А. П. Исаев, А. А. Астахов, Л. М. Куликов. – Челябинск : ЧГИФК, 1993. – 170 с.
13. Хаспекова, Н. С. Регуляция вариативности ритма сердца у здоровых и больных с психогенной и органической патологией мозга : дис. ... д-ра мед. наук : 03.00.13 / Н. С. Хаспекова. – М., 1996. – 217 л.
14. Баевский, Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма в космической биологии и медицине. Передача биомедицинской информации / Р. М. Баевский // Основы космической биологии и медицины : в 3 т. – 1975. – Т. 2 : в 2 кн. – Кн. 2. – С. 258.
15. Баевский, Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма в космической медицине / Р. М. Баевский // Физиология человека. – 2002. – Т. 28, № 2. – С.70–82.

16. Черникова, А. Г. Оценка функционального состояния человека в условиях космического полета на основе анализа вариабельности сердечного ритма : автореф. дис. … канд. биол. наук / А. Г. Черникова. – М. : ИМБП, – 2010. – 24 с.

17. В помощь практикующему врачу: анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем / Р. М. Баевский [и др.]. // Вестн. аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–84.

18. Баевский, Р. М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии / Р. М. Баевский. – М. : Медицина, 1979. – 295 с.

19. Машин, В. А. Анализ вариабельности ритма сердца при негативных функциональных состояниях в ходе сеансов психологической релаксации / В. А. Машин, М. Н. Машина // Физиология человека. – 2000. – Т. 26, № 4. – С. 48–54.

20. Баевский, Р. М. Математический анализ изменения сердечного ритма при стрессе / Р. М. Баевский, О. Н. Кириллов, С. З. Клецкин. – М. : Наука, 1984. – 222 с.

21. Леус, Э. В. Характеристика показателей вариабельности сердечного ритма у младших школьников / Э. В. Леус // Тез. докл. XVIII съезда физиол. о-ва им. И. П. Павлова. – Казань ; М. : ГЭОТАР-МЕД, 2001. – С. 540.

22. Important influence of respiration on human RR interval power spectral is largely ignored / T. E. Brown [et al.] // J. Appl. Physiol. – 1993. – Vol. 75. – P. 2310.

23. Вариабельность ритма сердца у лиц с повышенным режимом двигательной активности и спортсменов / А. Д. Викулов [и др.] // Физиология человека. – 2005. – Т. 31, № 6. – С. 54–59.

24. Сабирьянов, А. Р. Некоторые особенности вариабельности показателей центрального кровообращения в покое и при переходе в ортостатическое положение / А. Р. Сабирьянов // Вестн. ЮУрГУ. – 2003. – № 5 (6). – С. 95–98.

25. Сабирьянов, А. Р. Особенности частоты сердцебиений и ее спектральных характеристик до и после дозированной физической нагрузки в зависимости от исходных особенностей вариабельности ритма сердца / А. Р. Сабирьянов // Формирование здорового образа жизни : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Тюмень : Вектор Бук, 2004. – С. 220–224.

26. Сабирьянов, А. Р. Медленноволновая вариабельность фракции выброса левого желудочка у детей среднего школьного возраста / А. Р. Сабирьянов // Изв. Челяб. науч. центра УрО РАН. – 2004. – № 3. – С. 155–158.

27. Галеев, А. Р. Вариабельность сердечного ритма у здоровых детей в возрасте 6–16 лет / А. Р. Галеев, JI. Н. Игишева, Э. М. Казин // Физиология человека. – 2002. – Т. 28, № 4. – С. 54–58.

28. Вариабельность ритма сердца: представления о механизмах / С. А. Котельников [и др.] // Физиология человека. – 2002. – Т. 28, № 1. – С. 130–143.

29. Машин, В. А. Зависимость показателей вариабельности сердечного ритма от средней величины R–R интервалов / В. А. Машин // Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. – 2002. – Т. 87, № 7. – С. 851–855.

30. Никулина, А. В. Изменчивость вариабельности сердечного ритма как отражение реализации физиологических механизмов адаптации организма / А. В. Никулина, В. А. Козлов, А. А. Шуканов // Человек. Спорт. Медицина. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 14–20.

31. Вариабельность сердечного ритма у студентов с разной двигательной активностью / Ф. Б. Литвин [и др.] // Учен. зап. ун-та Лесгафта. – 2015. – № 7 (125). – С. 123–129.

32. Шлык, Н. И. Нормативы показателей вариабельности сердечного ритма у исследуемых 16–21 года с разными преобладающими типами вегетативной регуляции /

Н. И. Шлык, Э. И. Зуфарова // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2013. – № 4. – С. 96–105.

33. McCraty, R. Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health risk / R. McCraty, F. Shaffer // Glob Adv Health Med. – 2015. – Vol. 4 (1). – P. 46–61.

34. The utility of low frequency heart rate variability as an index of sympathetic cardiac tone: a review with emphasis on a reanalysis of previous studies / G. A. Reyes del Paso [et al.] // Psychophysiology. – 2013. – Vol. 50 (5). – P. 477–487.

35. Троицкая, Ю. В. Эволюция представлений о значении вариабельности артериального давления / Ю. В. Троицкая, Ю. В. Котовская, Ж. Д. Кобалава // Артер. гипертензия. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 13–24.

36. Шаварова, Е. К. Риск сердечно-сосудистых осложнений у пациентов с артериальной гипертонией: эволюция взглядов / Е. К. Шаварова, Э. Т. Муфтеева, Ж. Д. Кобалава // Артер. гипертензия. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 314–319.

37. Rothwell, P. M. Limitations of usual pressure hypothesis and the importance of variability, instability and episodic hypertension // Lancet. – 2010. – Vol. 375, № 9718. – P. 938–948.

38. Association between different measurements of blood pressure variability by ABP monitoring and ankle-brachial index / E. Wittke [et al.] // BMC Cardiovasc. Disorders. – 2010. – Vol. 10. – P. 10–55.

39. Сабирьянов, А. Р. Особенности медленноволновых колебаний артериального давления и периферического кровообращения у детей / А. Р. Сабирьянов // Клин. физиология систем. кровообращения. – 2007. – № 3. – С. 39–43.

40. Сабирьянов, А. Р. Возрастные особенности величин ударного объема в зависимости от преобладания диапазона спектра колебаний / А. Р. Сабирьянов, Е. С. Сабирьянова, А. Р. Баймышева // Сб. работ 69-й итоговой науч. сес. КГМУ и отд-ния мед.-биол. наук Центр.-Чернозем. науч. центра РАМН. – Курск, 2004. – Ч. I. – С. 52–53.

41. Епишев, В. В. Функциональное состояние сердечно-сосудистой системы и структура медленноволновых колебаний ее показателей у студентов 18–21 года при занятиях гимнастикой Тай-Цзи-Цуань : дис. ... канд. биол. наук : 03.00.13. / В. В. Епишев. – Челябинск, 2006. – 157 л.

42. Сабирьянова, Е. С. Закономерности онтогенетической адаптации сердечно-сосудистой системы и уровней ее регуляции к комплексу факторов внешней среды у детей, проживающих в условиях села и города : автореф. дис. ... д-ра мед. наук : 03.00.13 / Е. С. Сабирьянова. – Курган, 2010. – 45 с.

43. Астахов, И. А. Особенности в механизмах регуляции гемодинамики в условиях здоровья и при некоторых формах патологии на основе метода спектрального анализа : автореф. дис. ... канд. мед. наук / И. А. Астахов. – Челябинск, 1997. – 21 с.

44. Сабирьянов, А. Р. Структура медленноволновой вариабельности показательной гемодинамики, как интегральная характеристика активности уровней регуляции системы кровообращения у детей младшего и среднего возраста : дис. ... д-ра мед. наук / А. Р. Сабирьянов. – Курган, 2005. – 313 л.

45. Наумова, В. В. Медленные колебания гемодинамики у юношей и девушек в условиях покоя / В. В. Наумова, Е. С. Земцова // Бюл. СО РАМН. – 2008. – № 6 (134). – С. 174–179.

46. Астахов, А. А. Физиологические основы биоимпедансного мониторинга гемодинамики и анестезиологии (с помощью системы «Кентавр») : в 2 ч. / А. А. Астахов. – Челябинск, 1996. – Ч. 1, 2. – 330 с.

47. Виноградова, Т. С. Инструментальные методы исследования сердечно-сосудистой системы / Т. С. Виноградова. – М. : Медицина, 1986. – 416 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 24.09.2019

Savaneuski M. K., Khomich H. E. **Analysis of Slow Wave Oscillations of Functioning as One of the Research Methods of Cardiovascular System**

The article presents a review of the literature devoted to the study of low-frequency oscillations of the parameters of the cardiovascular system. The article presents the results of the authors' own research, indicating the presence of three types of slow-wave fluctuations in the tone of small blood vessels of the legs in girls at rest.

УДК 581.95

Н. В. Шкуратова
канд. биол. наук, доц., доц. каф. ботаники и экологии
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: botany@brsu.brest.by

СОСТАВ ИНВАЗИОННЫХ РАСТЕНИЙ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ РЕКРЕАЦИОННОЙ ЗОНЫ ПАРКА ВОИНОВ-ИНТЕРНАЦИОНАЛИСТОВ Г. БРЕСТА

Приводятся данные о современной структуре видов инвазионной флоры, распространенных на территории рекреационной зоны Парка воинов-интернационалистов г. Бреста. В фитоценозах исследованной территории выявлены 22 инвазионных вида растений из списка особо опасных в Беларуси, в том числе: Quercus robur, Sambucus nigra, Parthenocissus quinquefolia, Oenothera biennis, Lupinus polyphyllus, Phalacroloma annuum, Rumex confertus, Echinocystis lobata, Acer negundo, Populus alba, Solidago canadensis, Impatiens parviflora, Impatiens glandulifera, Rumex confertus, Xanthium albinum, Helianthus tuberosus, Sarothamnus scoparius, Galinsoga parviflora. Hippophae rhamnoides, Cornus alba, Galinsoga parviflora, Conyza canadensis. Наибольшим числом инвазионных видов представлено семейство Asteraceae. Большая часть видов имеет североамериканское происхождение.

Введение

Еще в 1980 г. В. И. Парфенов отмечал, что ожидается следующая динамика флоры Беларуси: «С одной стороны, флора будет обедняться за счет исчезновения ее старых представителей, с другой – обогащаться новыми видами», что обусловливается как климатическими изменениями, так и антропогенными процессами [1]. При этом в составе флоры адвентивный компонент по сравнению с аборигенным является менее стабильным и находится на стадии постоянного активного формирования [2]. Помимо хозяйственной деятельности человека значительный вклад в процесс нарастания доли адвентивного компонента в составе флоры вносит процесс интродукции экзотических растений, некоторые из которых смогли «ускользнуть» из культуры [3].

Интродукцию можно рассматривать как начальный этап процесса расселения вида за пределы исторического ареала. Наиболее приспособленные к условиям новой родины чужеродные виды после попадания в новую среду оказываются не подверженными действующим лимитирующим факторам, занимают новые места, притесняют аборигенные виды, в результате чего полностью меняется видовой состав экосистемы. Такая форма натурализации видов рассматривается как инвазия [4]. Инвазии чужеродных видов в современном мире выступают в качестве второй причины вымирания биологических видов после антропогенного загрязнения среды [5].

В составе адвентивного компонента флоры инвазивные растения представляют собой наиболее агрессивные чужеродные виды, вытесняющие местные, аборигенные растения. Термин «инвазионные растения» определяют как «объекты растительного мира, находящиеся за пределами их естественного ареала, распространение и численность которых создают угрозу жизни или здоровью граждан, сохранению биологического разнообразия, причинения вреда отдельным отраслям экономики» [6]. Фактором, способствующим активизации инвазий, могут являются также и изменения климата в сторону его потепления, позволяющие натурализоваться и давать жизнеспособное потомство более теплолюбивым засухоустойчивым чужеродным видам [7]. На терри-

тории Беларуси за последние десятилетия отмечается изменение границ агроклиматических зон, в том числе образование на юге Полесья новой, более теплой зоны [8].

Инвазионный вид лучше приспособлен к условиям обитаниям в антропогенно модифицированных сообществах вторичного ареала, чем аборигенные виды. Воздействие инвазионных видов на природные экосистемы может проявляться в виде конкуренции, гибридизации, переноса болезней и вредителей, выделении токсинов, модификации экологических условий, повышении степени пожароопасности, во взаимодействии с другими инвазионными видами и т. п. [4]. За последние два столетия в Европе ежегодно регистрируется около шести новых чужеродных видов, способных к натурализации [9]. В настоящее время занос живых организмов из одного района в другой имеет глобальный характер и является выражением одной из важнейших тенденций в развитии флоры – ее унификации. О глобальном характере процесса свидетельствует проникновение заносных растений также и на особо охраняемые территории [10].

Потенциально инвазионных видов Беларуси насчитывается более 200 [5]. В перечень особо опасных инвазионных растений, с которыми нужно проводить планомерную борьбу, определенный постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды, включены 55 видов сосудистых растений, которые способны к активному возобновлению, расселению и внедрению в естественные и нарушенные растительные сообщества [11]. Данный перечень подлежит уточнению и корректировке в зависимости от того, как изменится активность перечисленных инвазионных видов растений на территории нашей страны и на сопредельных территориях на определенных временных отрезках [5]. Видовой состав растений, причисленных к инвазионным в Беларуси во многом совпадает с таковым Средней России [9].

Ключевая рекомендация Стратегии по инвазионным видам в Европе – развитие региональной инвентаризации заносных видов, зарегистрированных в природе [9]. В связи с вышесказанным актуальность приобретает изучение состава, особенностей развития и репродукции инвазивных растений, оценка их конкурентоспособности в отношении местной флоры и их потенциальной экологической угрозы в пределах как климатических зон, так и отдельных территорий.

Целью данного исследования стало выявление видов урбанизированной территории, причисленных к группе особо опасных инвазионных растений в Беларуси на примере Парка воинов-интернационалистов г. Бреста.

Материалы и методы исследования

В природных экотопах Брестского Полесья, в том числе в лесных сообществах, обнаружены 236 видов адвентивных растений, которые оказывают негативное влияние на разнообразие аборигенной фракции флоры и на структуру фитоценозов. Исследования вне урбанизированных территорий Брестского Полесья показало присутствие 17 инвазионных видов, представляющих определенную угрозу для аборигенного биоразнообразия региона [2].

Однако наиболее инвазибельными являются индустриальные места обитания, пахотные почвы, парки и сады. В связи с этим определенный интерес относительно поиска инвазионных видов представляют урбанизированные территории, где сконцентрированы культурные или полуестественные растительные сообщества. На территории г. Бреста таковой является территория Парка Воинов-интернационалистов в микрорайоне «Восток». Это природный и культурно-просветительный комплекс, в котором парковая зона плавно перетекает в лесные массивы и луговые фитоценозы.

Парк окружают березовые и сосновые сообщества искусственного происхождения, залуженные земли, вышедшие из-под сельскохозяйственного использования, а также сообщества, которые сформировались при рекультивации нарушенных земель, песчаные карьеры у русла р. Мухавец, проселочные автодороги.

Исследования проводились маршрутным методом в вегетационные сезоны 2012–2018 гг. Осуществлялся сбор растительных объектов с последующей их гербаризацией. Видовая принадлежность определялась по изданию «Определитель высших растений Беларуси» [12]. Для отнесения видов к числу инвазивных для Республики Беларусь руководствовались данными Информационно-поисковой системы Центрального Ботанического Сада НАН Беларуси «Hortus Botanicus Centralis – Info» «Черная книга инвазионных видов: предварительный список для согласования и уточнения» [11].

Результаты и их обсуждение

Анализ воздушно-наземных местообитаний растительных сообществ окрестностей Парка воинов-интернационалистов позволил выделить 22 вида инвазионных растений из списка особо опасных в Беларуси.

Древесно-кустарниковые формы представлены девятью видами, а именно: *Acer negundo, Robinia pseudoacacia, Quercus rubra, Populus alba, Sambucus nigra, Parthenocissus quinquefolia, Cornus alba, Sarothamnus scoparius, Hippophae rhamnoides.*

Acer negundo L. (*Aceraceae* Juss.) значительно раньше других пород вступает в стадию семенного размножения, быстро возобновляется после скашивания На территории парка вид образует монодоминантные сообщества, где встречается и в виде дерева, и в виде кустарника, что характерно для всей территории Беларуси [7].

Среди древесных растений *Robinia pseudoacacia* (*Fabaceae* Lindl.) является лидером инвазий, поскольку ее вторичный ареал охватывает 41 европейскую страну. Распространение вида связано с его введением в культуру в качестве декоративного и для укрепления почвы [4]. На исследованной территории *Robinia pseudoacacia* внедрилась в сосновые и смешанные лесные сообщества, образуя подлесок, обильно расселилась по обочинам дорог, луговинам. В целом Брестская область является лидером по числу местообитаний и занимаемой данным видом площади [7].

Самосев *Quercus rubra* L. (*Fagaceae* Dumort.) (рисунок 1) в подросте сосняков парка успешно конкурирует с *Quercus robur* L. Этому способствует то, что инвазионный вид не имеет естественных вредителей, в отличие от аборигенного вида, поражаемого широким спектром вредителей – от грибов до насекомых. Кроме того обильный опад *Quercus rubra* разлагается более длительный период и тем самым угнетает растения травянистого яруса [13].

Sambucus nigra L. (*Caprifoliaceae* Juss.) в сосняках парка входит в состав подлеска, занимая относительно разреженные участки. Особи вида в большинстве своем цветут и плодоносят.

Древовидная листопадная лиана *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Plach. (*Vitaceae* Juss.) распространилась в сосняках парка и использует стволы сосны в качестве опоры (рисунок 2). Ягоды этого растения съедобны для птиц, что способствует распространению вида.

Cornus alba (L.) Opiz (*Cornaceae* Dumort.) обнаруживается под пологом высокоствольных деревьев на опушках, вдоль дорог, но одновидовых сообществ не формирует.

Полукустарник *Sarothamnus scoparius* (L.) Koch. (*Fabaceae* Lindl.) встречается на хорошо освещенных песчаных луговинах и опушках (рисунок 3). За последние пять-

десят лет количество подобных местообитаний вида на юго-западе Беларуси увеличилось значительно. На вероятность культурного происхождения вида на территории нашей страны указывала еще в 1931 г. О. С. Полянская, отмечая, что *Sarothamnus scoparius* высаживался в лесных сообществах для подкормки зайцев [14].

Рисунок 1. – *Quercus rubra*

Рисунок 2. – *Parthenocissus quinquefolia*

Рисунок 3. – *Sarothamnus scoparius*

Рисунок 4. – *Hippophae rhamnoides*

Populus alba L. (*Salicaceae* Mirb.) и *Hippophae rhamnoides* L. (*Elaeagnaceae* Juss.) (рисунок 4) задерняют песчаные малоплодородные почвы окрестностей парка, располагающиеся на заброшенных песчаных отвалах в близости от русла р. Мухавец, вдоль грунтовых дорог. Источником распространения *Hippophae rhamnoides* на исследованной территории послужили одичавшие заросли прежних усадьб. *Hippophae rhamnoides* в настоящее время оценивают как источник серьезной угрозы для флоры и фауны дюн. Отмечается, что присутствие видов на песчаных дюнах несколько изменяет уровень карбоната кальция, кислотность грунта, однако не оказывает существенного влияния на содержание органического вещества и соединения азота [9].

Обнаружены 13 инвазионных видов растений, представленных одно- или многолетними травами. Засоряют луговые местообитания, лесные опушки, вырубки, пустыри уже привычные для Брестского района виды *Oenothera biennis, Phalacroloma annuum, Conyza canadensis, Solidago canadensis, Rumex confertus*.

Oenothera biennis L. (*Onagraceae* Juss.) – вид, который, вероятно, возник в Европе, однако для большинства стран считается чуждым. Распространению *Oenothera biennis* способствовало разведение в садах. В техногенных экотопах часто выступает пионерным растением. Распространению вида, помимо высокой семенной продуктивности, способствует состояние органического покоя семян [9].

В луговых сообществах *Phalacroloma annuum* (L.) Dumort. и *Conyza canadensis* (*Asteraceae* Dumort.) преобладают над близкородственным аборигенным видом *Erigeron acris* L. Распространение *Conyza canadensis* приводит и к засорению посевов, что влечет значительное снижение урожаев, механические повреждения уборочной сельхозтехники из-за высокой плотности популяции и т. п. [9; 13].

В окрестностях парка *Solidago Canadensis* L. *(Asteraceae* Dumort.) выявлен в единичных изолированных местообитаниях: на опушке леса, опушке проселочной дороги (рисунок 5). Обычно этот вид вторгается на заброшенные поля и быстро распространяется, не требователен к почвенным условиям и плодородию почвы. Конкуренции с местными растениями и формированию монодоминантных сообществ способствует выделение *Solidago canadensis* аллелопатических веществ. Кроме того, вид может гибридизироваться с аборигенным представителем того же рода *Solidago virgaurea* L. [4; 9]. *Solidago canadensis* до сих пор пользуется популярностью как декоративное растение. На исследуемых территориях г. Бреста, как и по Брестской области в целом, местонахождения вида немногочисленны, в то время как в Минской области находятся 73 % местонахождений вида, зарегистрированных в Беларуси [7].

Повсеместно в луговых сообществах, на пустошах, обочинах дорог обнаруживается *Rumex confertus* Willd. (*Polygonaceae* Juss.). В отличие от предыдущего вида, *Lupinus polyphyllus* (*Fabaceae* Lindl.) регистрируется лишь в нескольких точках уже на протяжении значительного периода. *Lupinus polyphyllus* распространяется главным образом семенами. Следует отметить, что агрессивность большинства представителей *Fabaceae* Lindl., признанных инвазионными, объясняется широким введением их в культуру в качестве источника зеленых кормов и для повышения плодородия почвы [4].

В понижениях с более увлажненной плодородной почвой, заросших *Alnus glutinosa*, рудеральных местообитаниях, в приречных кустарниковых фитоценозах распространены *Echinocystis lobata* и *Impatiens glandulifera*.

Echinocystis lobata (Michl. ex Willd.) Britt. (*Cucurbitaceae* Juss.) – однолетнее вьющееся растение (рисунок 6). По нашим наблюдениям, за последние годы количество местонахождений в окрестностях Парка воинов-интернационалистов увеличилось.

Рисунок 5. – ***Solidago Canadensis***

Рисунок 6. – ***Echinocystis lobata***

Рисунок 7. – ***Impatiens glandulifera***

Рисунок 8. – ***Xanthium albinum***

Конечной фазой натурализации *Echinocystis lobata* является его внедрение в приречные кустарниковые фитоценозы, свойственные виду в естественном ареале [9], что уже наблюдается в черте г. Бреста. По Брестской области *Echinocystis lobata* встречается наименее часто в сравнении с остальными областями республики: 41 % от общего количества местонахождений вида в Беларуси (38,38 га) находятся на территории Могилевской области [7].

Impatiens glandulifera Royle (*Balsaminaceae* A. Rich.) – высокое однолетнее растение с гладким, обычно пустотелым и членистым стеблем, который легко ломается (рисунок 7). Стебель может достигать высоты 3 м, его диаметр доходит до нескольких сантиметров. Чаще всего инвазия этого вида идет только к изменению состава рудеральных сообществ и конкурирует только с видами, требующими повышенного содержания азота [9].

Еще один представитель семейства *Balsaminaceae* A. Rich. *Impatiens parviflora* DC. под пологом сосняков парка образует многочисленные монодоминантные сообщества.

Пески вдоль проселочных дорог, заброшенные песчаные отвалы у русла р. Мухавец и другие нарушенные местообитания заселяют *Helianthus tuberosus* и *Xanthium albinum*. Американское растение *Xanthium albinum* (Widder.) H. Scholz. *(Asteraceae* Dumort.) выделяется соплодиями с крючковидными жесткими шипами (рисунок 8). Проникновение вида на территорию Восточной Европы произошло из вторичного ареала в Западной или Центральной Европе. Высокая внутрипопуляционная изменчивость и способность к самоопылению обеспечили расселение вида без вмешательства человека [9]. *Helianthus tuberosus* L. *(Asteraceae* Dumort.) в конце прошлого столетия был популярен на приусадебных участках, где высаживался и как декоративное растение, для кулис. Благодаря образованию множества зимостойких клубней растение расселилось вблизи жилищ, на насыпях вдоль железных дорог и в других нарушенных местах.

Также в нарушенных местообитаниях и агроценозах повсеместно регистрируется *Galinsoga parviflora* Cav. (*Asteraceae* Dumort.). Вид является яровым однолетником, продуцирующим до 5–30 тыс. семянок с одного растения. Экспансия вида в Европе началась во второй половине XVIII в. от экземпляров, культивированных в Парижском ботаническом саду из перуанских семян [9]. Почти через столетие в конце XIX в. единично вид был зарегистрирован на территории современной Беларуси [13].

Таким образом, на исследованной территории выявлены представители 13 семейств. В разрезе семейств наибольшим количеством инвазионных видов характеризуются семейство *Asteraceae* (6 видов). Семейства *Fabaceae* и *Balsaminaceae* представленны тремя и двумя видами соответственно. Из состава семейств *Aceraceae, Fagaceae, Caprifoliaceae, Vitaceae, Cornaceae, Salicaceae, Elaeagnaceae, Onagraceae, Polygonaceae, Cucurbitaceae* выявлено по одному виду.

Заключение

По результатам проведенного исследования список агрессивных инвазионных растений наземно-воздушных местообитаний рекреационной зоны Парка воинов-интернационалистов г. Бреста насчитывает 22 вида, которые относятся к 13 семействам двудольных покрытосеменных.

По степени натурализации большую часть выявленных видов можно отнести к агриофитам, поскольку они успешно внедрились в естественные сообщества. К группе апекофитов, обнаруживаемых лишь в антропогенных местах обитания, можно отнести *Galinsoga parviflora, Helianthus tuberosus, Xanthium albinum, Impatiens glandulifera,*

Hippophae rhamnoides, распространение которых ограничивается только антропогенными местообитаниями.

По способу заноса среди выявленных инвазионных видов, как и среди видов адвентивного компонента флоры в целом, преобладают эргазиофигофиты. К числу ксенофитов можно отнести *Impatiens parviflora, Conyza canadensis, Galinsoga parviflora, Rumex confertus, Xanthium albinum*, поскольку на территорию Беларуси они попали случайно в результате естественной миграции или как следствие хозяйственной деятельности человека.

По времени заноса на территорию Беларуси выявленные виды можно разделить на неофиты и супернеофиты. Среди неофитов наиболее ранним временем заноса характеризуется *Sambucus nigra* L: вероятнее всего, на территорию Беларуси вид попал в конце XVII в., а натурализовалися *Sambucus nigra* в конце XVII в. [13]. Группа супернеофитов, проникновение которых на территорию Беларуси и натурализация произошли в XX в., довольно многочисленна: *Cornus alba, Phalacroloma annuum, Solidago canadensis, Xanthium albinum, Impatiens glandulifera, Impatiens parviflora, Echinocystis lobata, Lupinus polyphyllus, Quercus rubra, Rumex confertus.*

Первичным ареалом большинства выявленных видов (11 видов) является Северная Америка, что объясняется сходством природно-климатических условий, способствующих натурализации и распространению видов во вторичном ареале. Из Центральной и Южной Америки произошли *Galinsoga parviflora* и *Xanthium albinum*. Азиатское происхождения имеют *Cornus alba, Impatiens glandulifera, Impatiens parviflora, Hippophae rhamnoides*. Виды *Rumex confertus, Populus alba, Sambucus nigra* проникли во флору Беларуси из более южных и западных частей Европы.

Таким образом, инвазионные растения как элемент адвентивной фракции флоры г. Бреста характеризуются высокой степенью натурализации, преобладанием видов культурного происхождения и североамериканского происхождения. Среди выявленных инвазионных видов представлены неофиты и супернеофиты, что преимущественно связано с введением большей части видов в культуру в XIX–XX вв. на территории Беларуси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парфенов, В. И. Обусловленность распространения и адаптации видов растений на границах ареалов / В. И. Парфенов. – Минск : Наука и техника, 1980. – 208 с.

2. Савчук, С. С. Адвентивный комплекс видов флоры Брестского Полесья / С. С. Савчук // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2012. – № 2. – С. 21–26.

3. Дубовик, Д. В. Адвентивные виды растений во флоре Беларуси и их инвазионный потенциал / Д. В. Дубовик // Современное состояние, тенденции развития, рациональное использование и сохранения биологического разнообразия растительного мира : сб. материалов междунар. науч. конф., Минск – Нарочь, 23–26 сент. 2014 г. / редкол.: А. В. Пугачевский [и др.]. – Минск : Экопреспектива, 2014. – С. 100–102.

4. Виноградова, Ю. К. Инвазионные виды растений семейства Бобовых: люпин, галега, робиния, аморфа, карагана / Ю. К. Виноградова, А. Г. Куклина, Е. В. Ткачева. – М. : АБФ, 2014. – 304 с.

5. Дубовик, Д. В. Инвазионные виды во флоре Беларуси / Д. В. Дубовик, А. Н. Скуратович, Д. И. Третьяков // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов : материалы II Междунар. науч.-практ. конф.,

22–26 окт. 2012 г. / редкол.: В. И. Парфенова [и др.]. – Минск : Минсктиппроект, 2012. – С. 443–446.

6. Семченко, В. П. Проблемы чужеродных видов во флоре и фауне Беларуси / В. П. Семченко, А. В. Пугачевский // Науки и инновации. – 2006. – № 10 (44). – С. 15–20.

7. Масловский, О. М. Распределение инвазивных видов растений на территории Беларуси / О. М. Масловский // Современное состояние, тенденции развития, рациональное использование и сохранение биологического разнообразия растительного мира : сб. материалов Междунар. науч. конф., Минск – Нарочь, 23–26 окт. 2014 г. – Минск : Экоперспектива, 2014. – С. 100–102.

8. Как изменится климат Беларуси в ближайшие десятилетия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rg.ru/2018/09/20/kak-izmenitsia-klimat-belarusi-v-blizhajshie-desiatiletiia.html. – Дата доступа: 26.06.2019.

9. Виноградова, Ю. К. Черная книга флоры Средней России (Чужеродные виды растений в экосистемах Средней России) / Ю. К. Виноградова, С. Р. Майоров, Л. В. Хорун. – М. : ГЕОС, 2009. – 494 с.

10. Силаева, Т. Б. Инвазионные виды как угроза степному биоразнообразию / Т. Б. Силаева // Степи Северной Евразии : материалы VII междунар. симп. / под науч. ред. А. А. Чибилева. – Оренбург : Димур, 2015. – С. 769–771.

11. Черная книга инвазионных видов: предварительный список для согласования и уточнения [Электронный ресурс] // Информационно-поисковая система Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси. – Минск, 2000. – Режим доступа: http://hbc.bas-net.by/hbcinfo/invaslist.php. – Дата доступа: 25.02.2019.

12. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В. И. Парфенова. – Минск : Дизайн ПРО, 1999. – 472 с.

13. Растения-агрессоры. Инвазионные виды на территории Беларуси / Д. В. Дубовик [и др.]. – Минск : Беларус. Энцыкл. імя Петруся Броўкі, 2017. – 190 с.

14. Козловская, Н. В. Хорология флоры Белоруссии / Н. В. Козловская, В. И. Парфенов. – Минск : Наука и техника, 1972. – 312 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 30.09.2019

Shkuratova N. V. **The Composition of Invasive Plants in the Urbanized Territories on the Example of a Recreational Zone of the Park of Soldiers-Internationalists in Brest**

The article presents data on the modern structure of invasive flora species spread in the recreational zone of the Park of soldiers-internationalists of Brest. 22 invasive plant species from the list of especially dangerous in Belarus were identified in the phytocenoses of the studied territory. The family Asteraceae is represented by the largest number of invasive species. Most of the species are of North American origin.

УДК 551. 43(476)

Н. Ф. Гречаник
канд. геогр. наук, доц., доц. каф. географии и природопользования
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина
e-mail: Hrachanik55@mail.ru

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА АБЛЯЦИОННОЙ МОРЕНЫ НА ТЕРРИТОРИИ ВЫСОКОВСКОЙ РАВНИНЫ

Охарактеризован петрографический состав валунной, галечной и гравийной фракций абляционной морены в разрезе сожских моренных отложений на территории Высоковской моренно-водно-ледниковой равнины. Материал абляционной морены насыщен разноразмерным обломочным материалом в основном дальнеприносных пород во время припятского оледенения сожского времени. Петрографический состав моренных аккумуляций полимиктовый.

Введение

Определение петрографического состава грубообломочной фракции и установление источников сноса обломочного материала является одним из основных методов при исследовании древних покровных ледниковых отложений и реконструкции динамики ледниковых покровов. Территория равнины в четвертичное время неоднократно подвергалась экспансии покровных материковых оледенений. В процессе динамики покровных ледников подвергались экзарации породы, которые сформировались в различных фациальных обстановках мезозоя, палеогенового и неогенового периодов. После деградации наревского, березинского и припятского днепровского времени ледниковых покровов на территории равнины сформировались отложения ледниковой формации. В последующем эти отложения были подвергнуты переработке припятским ледниковым покровом сожского времени. Ледниковый покров этого времени в геолого-геоморфологической истории среднеплейстоценового развития территории был последним. В результате деградации этого покровного глетчера сформировался ледниковый комплекс рельефообразующих отложений, определяющий современный физиономический облик поверхности равнины. Кроме того, при таянии (абляции) покровного ледника определенная часть находящегося на поверхности и включенного в него обломочного материала выносилась талыми водами, а некоторая часть в промытом виде оседала и формировала чехол на основной морене. Такой покров имеет рыхлое сложение, малую мощность и мозаичное размещение на территории равнины. Он состоит из песчано-гравийно-галечного материала с примесью мелкозема и повышенным содержанием разноразмерных валунов в верхней части сформированных моренных отложений. Абляционная морена (морена вытаивания) на территории равнины отлагалась в пределах площадных полей мертвого льда. На некоторых участках в ее подошве отчетливо выражены термокарстовые провалы в результате вытаивания масс льда в подстилающей основной морене. В поозерское время эта территория развивалась в перигляциальных условиях. В настоящее время материал абляционной морены подвергается воздействию дождевых и талых вод, эоловых процессов и хозяйственной деятельности человека, связанной с сельскохозяйственным освоением территории.

Целью работы является установление петрографического состава обломочного материала различных фракций абляционной морены припятского оледенения сожского времени на территории Высоковской моренно-водно-ледниковой равнины.

Характеристика района работ

Район работ расположен на западе Республики Беларусь. Высоковская моренно-водно-ледниковая равнина с краевыми ледниковыми образованиями является одним из геоморфологических районов Беларуси [1]. В территориально-административном отношении большая часть территории геоморфологического района лежит в пределах Каменецкого, а также северной части Брестского районов. Речная долина Правой Лесной отделяет этот район от Вискулянско-Шерешевской равнины, а по левобережной части долины р. Лесная район граничит с Каменецкой равниной. С западной стороны проходит Государственная граница с Республикой Польша [1]. Территория вытянута с севера на юг на 54 км, с запада на восток на 30–35 км. В генетическом отношении рельеф Высоковской равнины образует парагенетический комплекс зон ледниковой аккумуляции и перигляциальной зоны, который включает ряд ступеней рельефа: 1) краевые ледниковые гряды; 2) участки моренной равнины; 3) участки водно-ледниковой равнины; 4) участки озерно-аллювиальной низины; 5) долины рек.

В целом для современной земной поверхности территории равнины характерна выраженная ярусность рельефа. Верхний ярус с абсолютными отметками более 175 м образуют останцы денудированных конечно-моренных гряд и холмов. Территории с отметками 165,0–175,0 м и 155,0–160,0 м образуют два яруса пологоволнистых моренных и водно-ледниковых участков равнины, осложненных холмами. Еще ниже на абсолютных отметках 145–150 м располагаются плоские слабовогнутые, в значительной степени заболоченные озерно-аллювиальные низины. Высотные отметки 140–121 м занимают речные долины, среди которых выделяются долины Пульвы, Правой Лесной, Лесной и Западного Буга. Речные долины врезаны в отложения окружающих территорий на 10–50 м и занимают самый низкий гипсометрический уровень земной поверхности. Высотные ярусы различаются не только гипсометрическим положением, но и возрастом, генезисом, а также строением.

Абсолютные отметки дневной земной поверхности изменяются в широком диапазоне от 121 до199 м. Максимальные высоты (175–199 м) характерны для центральной части равнины, где сосредоточены холмисто-увалистые конечно-моренные образования, среди которых выделяются холмоподобные формы диаметром до 2 км в основании. Данные формы трассируются в широтном направлении в виде линейных гряд длиной от 3 до 5,5 км при ширине до 0,5 км. Относительные превышения составляют 5–10 м. Крутизна склонов достигает 15°. В Высоковском конечно-моренном комплексе рельефа преобладают аккумулятивные краевые гряды, встречаются камы и озы. Наиболее высокая часть комплекса расположена у г. Высокое (абс. отм. 178 м) и д. Сухаревичи (абс. отм. 186 м). Система аккумулятивных гряд с маломощной моренной покрышкой отмечается у деревень Чепели – Минковичи – Кощеники – Проходы. В карьере д. Кощеники (Гора Товарная) отобранные пробы на геохронометрическое датирование показали возраст отложений в интервале 168–162 ± 14 тыс. лет, что соответствует отрезку времени, когда на этой территории существовал ледниковый покров сожского времени [9]. Участок холмистых моренных образований с отметками 168–186,2 м площадью 12,5 км^2 находится между деревнями Заполье и Зборомирово.

Ярус рельефа ниже конечно-моренных образований с высотами 165–175 м образован моренной равниной сожского времени с мелкохолмистой и пологоволнистой поверхностью. Она изрезана долинами рек и ручьев, впадающих в рек Правая Лесная, Лесная и Западный Буг. Наиболее сложно устроен участок, находящийся у деревень Паниквы – Новоселки – Ставы. Поверхность здесь мелкоувалистая, волнистохолмистая у д. Паниквы, волнистая у д. Ставы, холмистая у д. Волчин. Между деревнями Паниквы и Новоселки она изрезана небольшими оврагами и балками. На склонах крутизной 25°

развиты задернованные рытвины и террасеты. Волнистый характер поверхности у д. Ставы образован чередующимися эрозионными понижениями шириной до 300 м и повышенными участками шириной до 500 м. Понижения вытянуты в направлении р. Пульвы, и по их тальвегам происходит сток временных водотоков и талых вод. В западной части территории поверхность моренной равнины однообразная, выположенная. В районе д. Долбнево она расчленена системой ложбин временных водотоков, глубина вреза которых достигает 3–5 м. Северо-западнее д. Орля, на склонах долины р. Западный Буг моренная равнина расчленяется оврагами и балками глубиной 5–6 м и шириной 30–40 м. Южнее г. Высокое выделяются платообразные поверхности моренного рельефа площадью до 8 км^2. Повсеместно встречаются также заторфованные ложбинные понижения, по которым ранее осуществлялся сток талых ледниковых вод, имеющих характерный корытообразный поперечный профиль и многочисленные термокарстовые западины. Несколько меньший по площади участок моренной равнины находится южнее д. Большие Мотыкалы. Холмистые формы диаметром основания 1–1,8 км с относительным превышением 2–3 м простираются в широтном направлении от д. Теребунь до д. Ковердяки.

Высотный уровень в 155–160 м занимает пологоволнистая, плоская, реже волнистая водно-ледниковая равнина, среди которой выделяются камы, озы и термокарстовые западины. Участок волнистой равнины находится у деревень Залесье – Мачулище – Колодно – Гремяча. На западе равнины у д. Заречье распространены камы сожского возраста. Они образуют группу холмов высотой 5–10 м с крутизной склонов до 10°, шириной основания 100–250 м. На территории равнины выделяются также озовые формы. Одна из озовых гряд простирается от деревень Чернево – Минковичи – Борщево по направлению к д. Кустичи. Протяженность гряды 5,5 км, ширина 0,8–1 км, относительная высота 4–7 м.

На высотных отметках 145–150 м в окрестностях дд. Омельянец, Бобинка находятся участки озерно-аллювиальной низины. Поверхность таких участков плоская, местами слабо вогнутая, заторфованная, а в местах развития песчаных линейных аккумуляций – мелко-грядово-бугристая.

Значительное распространение на территории равнины получили формы рельефа, созданные постоянными водотоками, которые приурочены к самому низкому гипсометрическому уровню с отметками 121–140 м. Самой крупной речной артерией, протекающей по территории равнины, является Западный Буг. По его правобережью выделяется первая надпойменная терраса. Ширина ее колеблется от 0,2 до 3,5 км. Высота террасы над поймой от 2 до 8 м. Абсолютные отметки террасы от 149 до 161 м. Пойма имеет два уровня – 1,0–1,5 м и 3,0–3,5 м. Поверхность ее неровная, повсюду отмечаются мелкие старичные озера, прирусловые валы и гривы. Понижения часто заболочены. Большинство притоков Западного Буга имеют слабую морфологическую выраженность. Обычно это пологосклонные понижения шириной 20–25 м, преимущественно пойменные типа. Многие из них унаследовали ложбины стока талых ледниковых вод. У Западного Буга развита древовидная система притоков с правосторонней асимметрией водосбора, что хорошо согласуется со структурным планом и характером мезозойско-кайнозойских тектонических движений. Река течет в сторону снижения абсолютных отметок поверхности кристаллического фундамента. Река Лесная имеет хорошо выраженную долину шириной 3–5 км. Она прямо наследует существующую по поверхности кристаллического фундамента разломную зону между Кустинским и Ратайчицким блоками. Р. Пульва на участке от г. Высокое до д. Огородники наследует участок Высоковского разлома. На участке от д. Волчин до д. Загородная река делает изгиб, обходя возвышенную гряду, и от д. Загородная до д. Огородники Ставские имеет узкую долину

трапециевидного поперечного профиля с глубиной вреза от 2 до 7 м. Днище ее занято низкой поймой и руслом реки.

В тектоническом отношении Высоковская равнина соответствует наиболее пониженной в Беларуси части Подлясско-Брестской впадины. Глубина залегания кристаллических пород фундамента составляет от −0,6 до −1,6 км. Поверхность подошвы четвертичных пород имеет сложное строение. Здесь выделяются эрозионные ложбины, тальвеги которых опущены до 20 м, а в низовье р. Пульвы даже до −32 м. Ложбины в пределах района вытянуты в цепи субмеридионального, реже субширотного простирания и врезаны в породы мелового, палеогенового и неогенового возраста. Они разделяют изометричные участки высотой до 120 м. На этой неровной поверхности залегает покров моренных, водно-ледниковых, озерно-ледниковых, озерных, болотных, аллювиальных и других отложений мощностью от 60 до 130 м, а в ледниковых ложбинах свыше 170 м. Накопление четвертичных отложений территории происходило под воздействием эндо- и экзогенных факторов. Определенную роль при этом оказывал характер поверхности кристаллического фундамента, состав подстилающих отложений и рельеф ложа четвертичных отложений. Формирование четвертичных отложений предопределялось этими факторами, но основную роль играла деятельность покровных материковых оледенений.

Материал и методы

Материал для исследований отбирался из естественных и искусственных обнажений участков моренной равнины. Моренные отложения региона изучались общепринятым комплексом литологических методов с заверкой полученных данных результатами геохронометрического датирования ОЛИ (оптического люминесцентного излучения) (рисунок 1), выполненного в лаборатории люминесцентного датирования Политехнического института физики в Гливице (Республика Польша) [9].

Рисунок 1. – Место отбора пробы на геохронометрическое датирование

Проведены детальные полевые исследования в хорошо расчищенных обширных, разноглубинных выработках с отбором образцов, с прослеживанием характера контактов и условий залегания отложений и отбором валунно-галечных проб для установления питающих провинций и путей переноса обломочного материала. Отбор и исследование валунной фракции производились с поверхности ледниковых (моренных) форм рельефа, расположенных в окрестностях деревень Мельники, Пяски, Бордзедевка, Лесок, Чепели, Проходы, Кощеники, Зборомирово (рисунок 2). В ходе полевых исследований было отобрано 12 проб валунно-галечно-гравийного материала из моренных отложений. На площадке размером 25 м^2 проводился сбор обломков пород размером 100–150 мм. Площадки сбора валунного материала находились в непосредственной близости от естественных и чаще искусственных обнажений (рисунок 3). Отобранный валунный материал разделялся на группы пород: магматические, метаморфические и осадочные.

Из моренного материала обнажений и заложенных шурфов отбирались пробы объемом 15 л (25–30 кг), которые делились на отдельные фракции: галечную (10–99 мм), гравийную 1–9 мм и песчаную (меньше 1 мм). Материал галечной фракции рассматривался полностью с помощью лупы с пяти–десятикратным увеличением. Количество галек в каждой из проб варьировало от 350 до 815 шт. Из гравийной фракции для исследования отбирался материал 200 см^3 с размерностью зерен 5–9 мм. Количество гравийных зерен в каждой из проб составляло от 1100 до 2250 шт. Материал гравийной фракции всех проб, а песчаной фракции выборочно изучался при помощи стереоскопического микроскопа МБС-10. Обломочный материал из галечной и гравийной фракций сравнивался с изученными образцами валунной размерности.

Для определения питающих провинций и мест поступления обломочного материала моренных отложений использовались карты и литературные источники [3–8; 10].

а) б) в)

г) д) е)

Карьеры: а) – д. Мельники, б) – д. Бордзевка, в) – д. Чепели, г) – д. Проходы, д) – д. Кощеники (Гора Товарная), е) – д. Зборомирово

Рисунок 2. – Вертикальные разрезы отложений абляционной морены

а)

б)

а) – д. Пяски, б) – д. Лесок

Рисунок 3. – Площадные петрографические площадки

Результаты исследования

В результате изучения валунного, галечного и гравийного материала из абляционной морены припятского ледника сожского времени Высоковской равнины выделено 18 групп пород.

1. Группа кислых горных пород. Подгруппа гранитоидов. Группа включает порфировидные плагиомикроклиновые граниты, крупно-среднезернистые биотитовые граниты, двуслюдяной гранит, роговообманковый и роговообманково-биотитовый гранит, средне- и мелкозернистый плагиогранит, овоидный гранит рапакиви, гнейсовидный гранит, мигматит-гранит, гранитовый порфир, гранодиорит, гранитный пегматит, аплит, щелочной гранит.

Гранит – равномерно-зернистая горная порода с размером выделений полевого шпата и кварца 2–3 см. Порфировидный гранит сложен удлиненными или изометричными вкрапленниками, отличающимися по размерам (3–5 см) от минералов основной массы. Они представлены ортоклазом или микроклином, реже в изученных образцах – кварцем. Биотитовый гранит – наиболее представительный из гранитов абляционной морены, в котором среди цветных слагающих минералов доминирует черный биотит от 10–15 %. Обломочный материал валунной размерности включает также двуслюдяные граниты, в которых среди цветных минералов доминируют биотит и мусковит, реже биотит и флогопит. Среди валунной и галечной фракции моренного материала в незначительном количестве отмечаются гранитоиды только с роговой обманкой и роговой обманкой с биотитом, а также граниты с включением игольчатых кристаллов черного эгирина.

Гранит рапакиви, или финляндский гранит, – порфировидный гранит, в котором многочисленные округлые (овоидные) диаметром 1,5–3 см вкрапленники красноватого или розового ортоклаза окружены разноразмерной (3–6 мм) каймой серого, реже зеленовато-серого олигоклаза. Основную массу породы слагают зерна ортоклаза, плагиоклаза, кварца, биотита и роговой обманки.

Гнейсовидный гранит – равномерно-мелкозернистый гранит, в котором четко выделяется параллельная ориентировка чешуек слюды или призматических зеленовато-черных зерен роговой обманки. В материале отложений абляционной морены присутствуют в небольших количествах. В валунной фракции наиболее часто встречаются

в карьере деревень Кощеники, Проходы и на петрографических площадках у деревень Лесок и Пяски. В галечной фракции его присутствие незначительное.

Мигматит-гранит – порода гранитного состава, которая первоначально образуется в результате кристаллизации магмы из не полностью расплавленного материала. В материале отложений абляционной морены присутствуют в небольших количествах и наиболее часто встречаются на петрографических площадках у деревень Лесок и Пяски.

Гранитовый порфир получил такое название из-за особенностей структуры. Эта структура резко порфировидная. Основная масса породы тонко- и мелкозернистая. Вкрапленники размером от долей миллиметра до 2–4 мм представлены ортоклазом и кварцем в незначительном количестве, еще реже отмечается биотит и роговая обманка. Некоторые крупные валуны гранитоидов в отложениях абляционной морены у деревень Бордзевка и Проходы сильно выветрелые и при прикосновении к ним рассыпаются на мелкие дресвяные обломки.

Гранодиорит получил название по особенности состава – промежуточного между гранитом и диоритом. В изученных образцах валунной фракции порода имеет равномерно-зернистую структуру и массивную текстуру. Окраска ее более темная по сравнению с типичной окраской гранита. Объясняется это преобладанием темноцветных минералов в сложении породы над светлоокрашенными.

Гранитный пегматит является своеобразной породой среди группы гранитоидов. Для нее характерна гранитовая структура – это крупно- или грубозернистая гранитная порода, в которой полевой шпат образует изометричные зерна размером 1–3 см. Кварц при этом располагается между кристаллами полевого шпата. В гранитном пегматите графической структуры кварц образует вростки внутри моноблоков полевого шпата. Вростки кварца от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров имеют форму клина, уголка, треугольника. Порода доминирует в валунной фракции карьеров деревень Мельники и Зборомирово, а в галечной фракции отмечена в единичном количестве на петрографических площадках у д. Пяски.

Граниты, состоящие из щелочных полевых шпатов и щелочных пироксенов или амфиболов, получили название щелочных. В таких гранитах из моренных отложений равнины полевой шпат большей частью калиево-натриевый, представленный микропертитом или анортоклазом, реже чисто натриевый (альбит) или чисто калиевый (микроклин, ортоклаз). Валуны средних размеров этого гранита отмечены в карьерах у деревень Бордзевка и Зборомирово.

Аплит – жильная лейкократовая мелкозернистая, равномерно-зернистая порода, состоящая из светлоокрашенных минералов. Она обогащена кварцем, щелочным полевым шпатом и пневматолитическими минералами. На свежих сколах породы четко проявляется ее сахаровидный облик. В некоторых образцах аплита присутствуют акцессорные минералы – альмандиновый и спессартиновый гранат, а также турмалин. Небольшие валуны породы отмечены в карьерах деревень Чепели, Проходы и Зборомирово.

Гранитоиды валунной фракции абляционной морены являются доминирующими среди других представителей магматических пород. Основным регионом, из которого поступал этот материал, была фенноскандинавская питающая провинция. В конце среднего протерозоя в северо-западных районах Восточно-Европейской платформы (северное побережье Финского залива, северное Приладожье, Южная Швеция, Рижский залив) происходит магматическая активизация еще слабо консолидированного эпикарельского фундамента, его взламывание и внедрение интрузий гранитов рапакиви – порфировидных пород с крупными округлыми кристаллами калиевого полевого шпата (ортоклаза), окаймленными каемкой плагиоклаза (олигоклаза) [10].

2. Группа кислых горных пород повышенной щелочности. Подгруппа известково-щелочного сиенита. В материале абляционной морены в валунной фракции отмечены единичные образцы сиенита. Для этой породы характерна полнокристаллическая, равномерно-зернистая структура и массивная текстура. Порода состоит из полевого шпата (ортоклаз) и темноцветных минералов (роговой обманки, биотита, эгирина, рибикита) и акцессорных минералов – сфена и граната. Кварц отсутствует. Сиенит в изученных образцах представляет собой среднезернистую породу, состоящую из калиевого полевого шпата, средних плагиоклазов и роговой обманки с авгитом. Окраска породы светло-серая, реже бледно-розовая и красноватая. Внешне сиенит из валунной фракции очень похож на гранит и нефелиновый сиенит. При изучении шлифов, изготовленных из валунов, отмечено отсутствие в них кварца и нефелина.

3. Группа средних горных пород. Подгруппа диорита. В моренных отложениях отмечены средне- и крупнозернистые экземпляры породы, в которых преобладает кальциевый олигоклаз, а из цветных минералов роговая обманка и биотит. Структура породы гранитная в некоторых образцах порфировидная. Окраска породы темно-серая, иногда с поверхностным зеленоватым оттенком за счет продуктов изменения. Порфировая разновидность диорита – диоритовый порфирит характеризуется мелкозернистой основной массой и вкрапленниками плагиоклаза до 10 мм, роговой обманки 3 мм. Диорит присутствует в разных количествах как в вертикальных стенках карьерных обнажений, так и в пределах поверхностных петрографических площадок территории равнины.

4. Группа основных горных пород. Подгруппа габбро. В моренных отложениях равнины встречаются не часто. Порода кристаллически-зернистая, преобладают экземпляры мелко- и среднезернистые. Среди образцов доминируют валуны массивной текстуры, с однородной черной окраской, с равномерным распределением плагиоклаза, авгита и незначительного количества роговой обманки. В обнажении возле д. Пяски отмечены образцы порфировидного габбро с крупными кристаллами пирксена (авгита, возможно, его разновидности – диаллага) среди зернистой основной массы породы.

Подгруппа базальта – диабаза. Изученные образцы базальта из моренных отложений в количестве 12 штук имеют массивную текстуру, сложены основным плагиоклазом (лабрадор, битовнит) и авгитом, реже оливином. Окраска валунов темно-серая, а в смоченных образцах – черная. Диабаз в валунной фракции представлен единичными образцами. Это полнокристаллическая, равномерно-зернистая порода, состоящая из плагиоклаза (в основном из лабрадора) и авгита. Окраска породы темно-серая до черной на свежих сколах и зеленовато-серая на внешней поверхности валунов.

5. Группа собственно щелочных горных пород. Подгруппа нефелинового сиенита. Валуны нефелинового сиенита определены в обнажениях, расположенных возле деревень Пяски, Бордзевка, Зборомирово и галечниковой россыпи на двух площадках у д. Лески. Для образцов нефелинового сиенита характерна полнокристаллическая среднезернистая структура и массивная текстура. Состав – микроклин и альбит, нефелин, щелочные пироксены (эгирин, эгирин-авгит) и амфиболы (рибекит), а также акцессорные минералы (апатит, сфен, астрофиллит). Окраска валунов и крупных галек на свежих сколах светло-серая, зеленовато-желтая, а на выветренной поверхности с голубоватым оттенком.

Представители пород второй, четвертой и пятой групп в материале абляционной морены валунной и галечной фракций присутствуют в незначительных количествах. Несколько больше в моренном материале этих фракций – представителя третьей группы пород – диорита. Основным источником материала представителей пород этих групп в моренных отложениях равнины является северо-западная часть территории докембрийской Восточно-Европейской платформы.

6. *Группа гнейсов.* Гнейсы – метаморфические горные породы, состоящие преимущественно из полевых шпатов и кварца. В их составе присутствует один или несколько цветных минералов: биотит, мусковит, минералы группы амфиболов и пироксенов, наряду с которыми довольно часто присутствуют различные разновидности граната. Группу гнейсов валунной фракции моренного материала составляют средне- и мелкозернистые биотитовые, мусковитовые, двуслюдяные, амфибол-биотитовые, амфибол-диопсидовые, амфиболовые гнейсы, плагиогнейсы, плагиогранитогнейсы. Названия перечисленных разновидностей гнейсов происходят от названий соответствующих цветных минералов, присутствующих в породе. Характерной особенностью всех гнейсов перечисленной группы является полосчатая, очковая и плойчатая текстура. Структура полнокристаллическая, мелко-, средне-, иногда грубозернистая (гранобластовая). Доминирующими среди гнейсов являются ортогнейсы, образовавшиеся при метаморфизации магматических пород (гранитов, диоритов, сиенитов). Они в материале валунной фракции представлены гранито-гнейсом и очковым гнейсом. Гранито-гнейс – порода массивной текстуры, как правило, она слабополосчатая и наиболее близка к гранитоидам. Очковый гнейс – разновидность гранито-гнейсов. В этой породе полевой шпат кроме мелких кристаллических зерен в основной массе породы образует крупные, до 2,5 см, порфиробласты линзовидной или округлой формы. Гнейсы среди представителей метаморфических горных пород в моренных отложениях валунной и галечной фракций являются доминирующими.

7. *Амфиболиты.* Эти породы представлены массивными, полосчатыми средне- и мелкозернистыми разностями, иногда сильно выветрелыми, состоящими из роговой обманки и плагиоклаза (альбит, олигоклаз, битовнит). В качестве дополнительных минералов присутствуют эпидот, хлорит, сфен, апатит, биотит или гранат. Структура породы полнокристаллическая, реже гранобластовая. Амфиболиты в моренных отложениях территории не имеют широкого распространения. В составе валунной фракции на всех обозначенных стенках карьерных разработок, поверхностных площадках и шурфах обнаружено 27 образцов породы, еще меньше в составе галечной фракции – 16 штук.

8. *Кварцит.* В валунной фракции моренных отложений в незначительных количествах отмечены темно-серые, редко серо-зеленоватые и серо-голубые экземпляры породы. Структура породы кристаллически-мелкозернистая. Порода крепкая, с раковистым изломом на свежих сколах. В разрезе моренных отложений карьера д. Мельники отмечены образцы мелких валунов кварцито-песчаника. В этой породе сочетаются типичные признаки и свойства кварцита и песчаника.

9. *Мигатит.* В вертикальных стенках карьерных выработок и на площадных участках отмечены единичные валунные разности породы. Структура породы полнокристаллическая, среднезернистая, в некоторых образцах гранобластовая. Текстура полосчатая с чередующимися слоями темного метаморфического и светлого гранитного состава материалов. Порода плотная, твердая, окраска темно-серо-черная, определяется цветовой гаммой разноокрашенных полос. Минеральный состав породы включает полевые шпаты, кварц, роговую обманку, биотит и авгит. В коренном залегании мигматиты широко распространены на обширных площадях континентальных докембрийских щитов [10].

10. *Роговик.* Единичные образцы породы в форме небольших валунов отмечены на петрографических площадках у д. Пяски. Порода скрытокристаллической структуры, массивной текстуры. Окраска темно-серая, некоторые обломки породы зеленовато-серые. Порода крепкая, с трудом разбивается молотком, на краях свежих сколов острая с раковистым или занозистым изломом.

11. Кристаллические сланцы. Структура породы зернисто-чешуйчатая. Текстура сланцеватая параллельно-полосчатая. Цвет темно-серый до черного. Минеральный состав – слюда, кварц, роговая обманка, гранат (альмандин), дистен и сфен. Порода непрочная, выветрелая, некоторые образцы разламываются в руках.

12. Зеленокаменные метаморфические породы. Данные породы в небольших количествах отмечены во всех карьерных выработках и на полевых площадках. Структура зеленокаменных пород из моренных отложений тонкозернистая, иногда порфировая. По текстурным особенностям они массивные, однородные, пятнистые. Породы крепкие, цветовая гамма включает различные оттенки зеленого цвета. Главные минералы – кварц, альбит, хлорит, эпидот, актинолит, в некоторых образцах присутствует альмандин.

Основным источником материала пород представителей шестой – двенадцатой групп в моренных отложениях равнины является северо-западная часть территории докембрийской Восточно-Европейской платформы.

13. Песчаник. Песчаники представляют собой однородный или слоистый агрегат обломочных зерен (песчинок), прочно связанных минеральным веществом (цементом). Минеральный состав песчаников моренных отложений равнины отличается большим разнообразием. Здесь имеются олигомиктовые и полимиктовые разновидности. К первой группе относятся кварцевые песчаники, содержащие около и более 90 % кварца, а также глауконито-кварцевые и слюдисто-кварцевые, содержащие 65–85 % кварца. Минеральный состав полимиктовых песчаников включает наряду с кварцем калиевый или натровый полевой шпат. Среди полимиктовых песчаников в моренных отложениях доминируют аркозовые, содержащие до 30 % полевого шпата. Песчаники являются доминирующими среди осадочных пород во всех фракциях моренных отложений Высоковской равнины. Окраска песчаников довольно пестрая: от светло-серой, зеленовато-серой, темно-буро-красноватой до темно-коричневой. Различные сочетания минерального состава песчаников отражают особенности областей сноса и процессов отложения в собственно-ледниковых аккумуляциях. Глауконитовый песчаник светло-зеленой окраски с небольшими темно-бурыми пятнами фосфорита галечной фракции отмечен в небольших количествах (5 штук) в карьере д. Чепели. Аркозовые песчаники первоначально образуются за счет крупнокристаллических кварц-полевошпатовых пород кристаллического фундамента и его щитовых областей [10]. Аркозовые песчаники в моренных отложениях равнины валунной и гравийной фракций являются дальнеприносными из фенноскандинавского центра оледенения. Олигомиктовые разновидности песчаников – продукт местной белорусской питающей провинции. Глауконитовый песчаник принесен ледником из ордовикских отложений Прибалтики.

14. Конгломерат. Полимиктовая сцементированная горная порода с более грубыми окатанными обломками, чем в песчаниках. Размерность сцементированных обломков в обнаруженных конгломератах моренных отложений равнины варьирует от 0,5 до 25 мм. Состав обломков галечной размерности и включает кварц, гранит, гнейс, кремень. Связующая масса – плохо сортированный песчано-илистый материал. Большое количество валунов и галек конгломератовой породы обнаружено в карьерных выработках у деревень Проходы, Пяски и Чепели, а также на площадках у д. Лесок.

15. Брекчия. Полимиктовая сцементированная горная порода с более грубыми неокатанными (угловатыми) обломками, в отличие от конгломерата. Состав обломков и связующая масса идентичны конгломератам. Размерность угловатых включений варьирует от 10 до 35 мм. Брекчевидные породы валунной размерности наиболее часто встречаются в верхней части разреза абляционной морены у д. Мельники. Конгломера-

товидные и брекчевидные породы в моренных отложениях равнины дальнеприносные из фенноскандинавского центра оледенения.

16. Известняк. Горная порода, состоящая из кальцита или арагонита. В моренных отложениях района исследований в валунной фракции обнаружены хемогенные и органогенные известняки. Хемогенные известняки возникли за счет накопления $CaCO_3$ из поддонной воды в морских водоемах. Хемогенные известняки в моренных образованиях из местной питающей провинции, сформированной в меловое время в морских условиях.

Органогенный известняк в моренных отложениях представлен известняками морского генезиса. Эти известняки сложены карбонатными скелетными остатками животных или растительных организмов или продуктов их жизнедеятельности (зогенные и фитогенные известняки). Биогенные известняки различаются по преобладающему организму – породообразователю. Среди зоогенных известняков, обнаруженных в валунной и галечной фракциях моренных отложений равнины, выделены: фораминиферовые, мшанковые, коралловые, брахиоподовые, гастроподовые, криноидные и трилобитовые. Среди фитогенных выделены водорослевые – онколитовые и строматолитовые. Известняки среди осадочных горных пород в абляционных моренных аккумуляциях валунной и особенно галечной фракции наряду с песчаниками являются доминирующими. Органогенные известняки в моренных отложениях равнины принесены с территории Прибалтики, где они в составе ордовикско-силурийских отложений поверхностно обнажены [7].

17. Доломит. В моренных отложениях встречается в небольших количествах. Первоначально порода образуется в морских бассейнах как продукт химического осаждения. Такой морской бассейн в девонское время существовал там, где сейчас располагается северная часть Беларуси. Единичные образцы микрозернистого доломита, образовавшегося в девонском морском бассейне, выделены в карьерном разрезе моренных отложений деревень Кощеники и Зборомирово. Эта порода в абляционной морене – из местной белорусской питающей провинции.

18. Кремень. Кремень является агрегатом кристаллического или аморфного кремнезема. В моренных отложениях встречается в виде разноразмерных обломков, иногда причудливой формы, и кремневых конкреций (стяжений). Первоначально кремни образовались различными способами. Одни из них возникли путем выпадения опалово-халцедонового вещества из циркулирующих растворов и заполнения этим веществом пустот, имеющихся в породах. Другие образовались в процессе диагенеза, путем отложения опалово-халцедонового вещества вокруг какого-либо центра (затравки) в результате действия кристаллизационных сил. Кремниевые конкреции и разнообразной формы кремниевые стяжения очень часто встречаются в ледниковых отторженцевых образованиях, состоящих из известняка мелового возраста. В моренных отложениях сожского времени на территории равнины кремень имеет широкое распространение и связан с местной питающей провинцией.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное и базируясь на анализе особенностей размещения, строения и петрографического состава материала различных фракций абляционной морены припятского ледника сожского времени на территории Высоковской равнины, можно сделать следующие выводы:

1) площади абляционной морены (морены вытаивания) – результат деградации полей мертвого льда;

2) петрографический состав валунной, галечной и гравийной фракций абляционной морены – полимиктовый;

3) доминирующими в валунной и галечной фракциях морены являются представители группы кислых пород подгруппы гранитоидов;

4) гнейсы в моренных отложениях валунной и галечной фракций по сравнению с гранитоидами распространены меньше;

5) песчаники и другие представители осадочных пород в моренных отложениях присутствуют приблизительно в одинаковых соотношениях с представителями метаморфических горных пород;

6) в материале валунной, галечной и гравийной фракций доминируют представители дальнеприносных фенноскандинавских пород, в меньших количествах присутствуют породы с территории Прибалтики и местной питающей провинции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречаник, Н. Ф. Характеристика геоморфологических районов территории Подлясско-Брестской впадины / Н. Ф. Гречаник // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2012. – № 1. – С. 85–99.

2. Матвеев, А. В. Рельеф Белоруссии / А. В. Матвеев, Б. Н. Гурский, Р. И. Левицкая. – Минск : Навука і тэхніка, 1988. – 319 с.

3. Государственная геологическая карта Российской Федерации (третье поколение. Серия Балтийская. Геологическая карта дочетвертичных образований. Лист Q – (35, 36) / гл. ред. Ю. Б. Богданов. – 1 : 1 000 000, 10 км в 1 см. – СПб. : Картогр. ф-ка ВСЕГЕИ, 2012.

4. Объяснительная записка к Геологической карте северо-восточной части Балтийского щита масштаба 1 : 500 000 / А. Т. Радченко [и др.]. – Аппатиты : Изд-во КНЦ РАН, 1994. – 95 с.

5. Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shild) / ed. F. P. Mitrofanov. – Apatity, 1995. – 145 p.

6. Ледавіковыя валуны Беларусі. Эксперыментальная база вывучэння валуноў / С. Д. Астапава [і інш.]. – Мінск : Навука і тэхніка, 1993. – 159 с.

7. Кривцов, А. И. Геология и полезные ископаемые Литовской ССР / А. И. Кривцов. – М., 1949. – 499 с.

8. Tolkanowicz, E. Mapa kruszywa naturalnego w Polsce. – 1 : 500 000 / E. Tolkanowicz, K. Żukowski. – Warszawa, 2001.

9. Geological map of southern part of Polish-Belarusian Cross-Border Area Biala Podlaska and Brest region. – 1 : 250 000 / Explanatory text. Scientific editors: L. Marks, A. Karabanov. – Warszawa, 2017. – 129 p.

10. Короновский, Н. В. Краткий курс региональной геологии СССР / Н. В. Короновский. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 308 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 16.09.2019

Grechanik N. F. **Petrographic Composition of the Clastic Material from the Ablation Morena on the Territory of Vysokoe Plain**

The article described petrographic composition of boulder, pebble and gravel fractions from moraine ablation in the context of Sozh moraine deposits on the territory of the Vysokovskaya moraine-water-glacial plain. The material of the ablative moraine is saturated with variously sized clastic material of mainly farbearing rocks during the Pripyat glaciation of Sozh time. The petrographic composition of moraine accumulations is polymictic.

УДК 911.3 (476)

С. В. Корженевич
канд. геогр. наук, доц., преподаватель географии Пинского колледжа
УО «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина»
e-mail: KSV1974@tut.by

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ДЕМОГРАФИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В БЕЛОРУССКОМ ПОЛЕСЬЕ

Рассмотрена одна из актуальных проблем Белорусского Полесья – депопуляция населения региона. На основании статистических данных проанализированы территориальные особенности естественного движения населения региона, динамика рождаемости и смертности. Охарактеризованы особенности миграционных процессов Белорусского Полесья. Дан прогноз динамики миграционного движения Полесского региона, показана динамика роста численности городского населения. Дан прогноз развития демографической ситуации в рассматриваемом регионе исходя из тенденций, связанных с эффектом «демографических волн».

Введение

Проект Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2030 г. предполагает равновесное развитие каждого региона с учетом эффективного использования его ресурсного потенциала и конкурентных преимуществ в интересах обеспечения высоких стандартов жизни населения и их позитивного вклада в национальную конкурентоспособность и безопасность. В этой связи комплексное изучение регионов страны, разработка и реализация программ их социально-экономического развития относится к числу приоритетных задач науки в стране. Одним из своеобразных регионов Беларуси является Белорусское Полесье: его геологическое строение, рельеф, климат, почвенный покров, гидрология, другие компоненты природной среды имеют значительные отличия от других регионов. Сложность современной демографической ситуации, решение задач демографической безопасности требуют комплексного подхода к изучению особенностей населения Республики Беларусь, и прежде всего региональных. При общей трансформации демографических структур основные черты пространственной неоднородности проявляются как на мезогеографическом, так и на микрогеографическом уровне. При этом следует заметить, что чем ниже территориальный уровень, тем существенней проявляются различия [1, с. 4].

Границы регионов, выделенных в качестве объектов региональной политики, могут совпадать с границами отдельных и нескольких административно-территориальных единиц [2, с. 348]. Определение территориальной составляющей Белорусского Полесья носит дискуссионный характер. Например, в первом специальном межведомственном сборнике «Проблемы Полесья», датированном 1972 г., границы региона определялись в пределах бассейна р. Припять. При таком подходе в его состав были включены некоторые районы Предполесья (Барановичский, Копыльский, Пружанский, Слуцкий), которые по своим физико-географическим характеристикам не вполне соответствуют особенностям Полесского края [3]. В работе «Белорусское Полесье: проблемы развития и размещения производительных сил» под редакцией С. И. Сидора при определении территориальной составляющей Белорусского Полесья использовался гипсометрический подход (высота до 200 м), совмещенный с административными районами. Исходя из этого пространственная составляющая изучаемого объекта несколько сузилась, и некоторые типично полесские районы (Гомельский, Добрушский, Жлобинский) не были включены в состав региона [4]. Нами было выполнено

сопоставление политико-административной карты, карт «Ландшафтное районирование Республики Беларусь», «Физико-географическое районирование Республики Беларусь», «Население Республики Беларусь», позволяющее установить, что из 16 административных районов Брестской области в состав региона полностью или частично входят 13, из 21 района Гомельской области – 19. Также в состав Полесского региона входят три района Минской области и один Могилевской [5, с. 31]. Систематическое изучение демографических особенностей Белорусского Полесья будет способствовать более аргументированному ведению хозяйственной деятельности и осуществлению мер демографической и социальной политики государства в регионе.

Результаты исследований и их обсуждение

Численность населения Белорусского Полесья на 1 января 2019 г. составила 2 677,6 тыс. человек. По сравнению с аналогичным периодом предыдущего года она сократилась на 9,4 тыс. чел. В целом, начиная с начала 1990-х гг., в регионе наблюдается постоянная тенденция к его уменьшению. Изучение демографической динамики Белорусского Полесья позволило установить ряд причин, прямо или косвенно повлиявших на изменение численности населения страны:

1) особенности структуры и воспроизводства населения, сложившиеся в предыдущие годы, следствием которых стала депопуляция населения;

2) отрицательное сальдо миграции;

3) трансформация социально-экономической системы;

4) экологическая ситуация в некоторых районах Гомельской области, Солигорском районе Минской области.

Сеть поселений региона объединяет 62 городских и более 4200 сельских населенных пунктов. При относительно равномерной сети поселений характер расселения в Белорусском Полесье отличается значительной неоднородностью. В пяти городах (Брест, Гомель, Мозырь, Пинск, Солигорск) сосредоточено 1 265,8 тыс. человек, что составляет 47,5 % населения региона. В остальных 57 городских поселениях проживает 725,4 тыс. человек (26,9 %). Таким образом, показатель урбанизации Белорусского Полесья составляет 74,4 %, что ниже республиканских показателей примерно на 4 %. Следует отметить, что в 2009 г. данный показатель отличался на 5,2 %, а это говорит об увеличении темпов урбанизации в регионе за последнее десятилетие [1, с. 19].

Таблица 1. – Динамика численности населения Белорусского Полесья

Год	Население				
	Общая численность, тыс. человек	Городское, тыс. человек	Сельское, тыс. человек	Городское, %	Сельское, %
1989	2 992,7	1 800,8	1 191,9	60,2	39,8
1999	2 917,7	1 878,9	1 038,8	64,4	35,6
2009	2 780,0	1 913,9	866,1	69,3	30,7
2014	2 701,0	1 951,8	749,2	72,3	27,7
2018	2 687,0	1 986,6	700,4	73,9	26,1
2019	2 677,6	1 991,2	686,4	74,4	25,6

Начиная с 1989 г. также зафиксировано снижение удельного веса региона в общей численности населения республики. При этом темпы его падения имели стабильный характер. В конечном итоге в 2019 г. удельный вес населения Белорусского Полесья

составил 28,26 % против 29,48 % в 1989 г. При этом одной из важнейших причин стали миграционные процессы. Миграционное движение в Белорусском Полесье включает три основных вида миграции: внутрирегиональную (перемещение населения в пределах региона); республиканскую (обмен населения с районами и областями страны, находящимися за пределами Белорусского Полесья); международную (процессы движения мигрантов между регионом и другими государствами). Исходя из особенностей развития Белорусского Полесья и специфики миграционных процессов на территории региона, в настоящий период миграционное движение населения определяют в большей степени экономические и образовательные факторы. Своеобразным видом миграции является скрытая, когда преимущественно мужское население покидает пределы страны и осуществляет трудовую деятельность за пределами Республики Беларусь. Потоки международной миграции данной «специализации» в большинстве были направлены в Российскую Федерацию. Этот процесс характерен как для малых городов и сельских поселений Белорусского Полесья, так и для крупных городов. При этом следует отметить, что в 2018–2019 гг. изменился вектор направления рабочей силы: увеличился поток трудовых мигрантов в Польшу и Чехию.

	1989 г.	1999 г.	2009 г.	2014 г.	2018 г.	2019 г.
Белорусское Полесье	29,48	29,05	28,74	28,52	28,3	28,26
Республика Беларусь	70,52	70,95	71,25	71,48	71,7	71,74

Рисунок 1. – Удельный вес населения Белорусского Полесья в общей численности населения республики, %

По удельному весу городского населения (с учетом городов областного подчинения) районы Белорусского Полесья можно разделить на следующие категории:

1) сильно урбанизированные – свыше 75 %;
2) урбанизированные – 51–75 %;
3) преимущественно урбанизированные – 41–50 %;
4) преимущественно сельские – 31–40 %.

Данная классификация не в полной мере отражает характер урбанизационных процессов Белорусского Полесья: многие районы существенно отличаются друг от друга площадью территории, количеством населения. Также существенную роль в урбанизационных показателях играет наличие в районах крупных промышленных центров. Неслучайно самые большие показатели урбанизированности территорий отмечены в тех районах, где есть крупные промышленные центры: Брест, Гомель, Пинск, Мозырь и др. Заслуживает внимания тот факт, что районы с большей площадью имеют меньшие показатели урбанизированности территории. Демографические потери сельского населения юго-восточной части Белорусского Полесья привели к тому, что показатели урбанизации таких районов, как Ельский, Наровлянский, Хойникский, достаточно высоки. Демографическое развитие данных районов в послечернобыльский период характеризуется как очень нестабильное, с катастрофическими по темпам и масштабам потерями сельского населения, с резкой территориальной дифференциацией демографических процессов по сравнению с другими. Интенсивность людских потерь распределилась по территории прямо пропорционально степени радиационного загрязнения [6, с. 122].

Таблица 2. – Распределение районов Белорусского Полесья по уровню урбанизации

Свыше 75 %		51–75 %	41–50 %	30–40 %
Район	Брестский, Гомельский, Жлобинский, Мозырский, Наровлянский, Пинский, Светлогорский, Солигорский	Березовский, Ганцевичский, Глусский, Добрушский, Ельский, Житковичский, Жабинковский, Ивацевичский, Калинковичский, Кобринский, Лоевский, Лунинецкий, Речицкий, Рогачевский, Хойникский	Брагинский, Ветковский, Дрогичинский, Ивановский, Клецкий, Лельчицкий, Любанский, Ляховичский, Малоритский, Октябрьский, Петриковский	Буда-Кошелевский, Столинский,

Процессы рождаемости и смертности на территории Белорусского Полесья в целом имеют примерно такую же динамику, как в Республике Беларусь. Увеличение показателей рождаемости во втором десятилетии XXI в. объясняется тем, что в активный фертильный возраст начало вступать относительно многочисленное поколение 1980-х гг. Снижение показателей рождаемости, зафиксированное как в Беларуси, так и в Белорусском Полесье с 2017 г., во многом связано с изменением тенденций рождаемости в предшествующие периоды: в активный репродуктивный возраст вступает малочисленное поколение второй половины 1990-х гг., а также первого десятилетия XXI в.

Также на процессы рождаемости влияет изменение брачного поведения населения, которое привело к расширению форм совместной жизни, в частности к росту числа браков, не зарегистрированных органами ЗАГСа. Незарегистрированным браком является такой союз, в котором совместно проживающие мужчина и женщина считают себя мужем и женой и признаются таковыми окружающими. В последнее время все большее распространение получают формы сожительства, которые далеко не всегда можно счи-

тать незарегистрированным браком: если пары не имеют своего домохозяйства, а лишь встречаются время от времени и не планируют обзаводиться детьми [7, с. 353]. Высокая эффективность планирования семьи, сосредоточение на самореализации находят отражение в более позднем возрасте вступления в брак, позднем деторождении, что является одной из причин уменьшения показателей рождаемости и отражает общемировые тенденции [8, с. 138–139]. При этом данные показатели характерны как для женщин, так и для мужчин. Немаловажную роль в брачных процессах играет феминизация, когда наблюдается изменение роли и места женщины в современном обществе (карьера, нежелание иметь детей, финансовая независимость).

Рассматривая тенденцию смертности в Белорусском Полесье, следует отметить не только усиление негативных характеристик – омоложение смертности, уменьшение продолжительности жизни мужчин, увеличение количества умерших в трудоспособном возрасте, но и уменьшение показателей коэффициента младенческой смертности [9, с. 121]. Старение многочисленного поколения, родившегося после окончания Второй мировой войны (вторая половина 1940-х – начало 1960-х гг.), будет способствовать усилению депопуляционных процессов в стране. Показатели смертности в большинстве районов характеризуются не только высокими, но и критическими значениями (Ветковский, Глусский, Клецкий, Ляховичский, Петриковский р-ны). Основными причинами такой ситуации выступает возрастная структура населения, характеристикой которой является резкое старение населения, экологическая обстановка в целом регионе, качество медицинского обслуживания.

Важной характеристикой демографического развития региона являются показатели естественного прироста, убыли населения. В подавляющем большинстве районов Белорусского Полесья отмечена естественная убыль населения. Тем не менее уже начиная с 2011 г. в некоторых районах региона стали фиксироваться процессы репопуляции. В некоторых районах данная тенденция имела устойчивую динамику, в других естественный прирост населения фиксировался только в отдельные годы.

Таблица 3. – Общие коэффициенты естественного прироста, убыли (−) населения в некоторых административных районах Белорусского Полесья*

Административный район	Год						
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Брестский	0,1	−0,3	1,4	2,8	1,6	2,4	1,2
Жабинковский	−1,8	−2,3	–	1,4	−0,4	−1,6	−1,7
Кобринский	−1,0	1,1	0,1	1,2	1,0	1,7	−1,7
Лунинецкий	−2,9	−2,5	−1,6	−1,2	−0,7	0,2	−2,1
Малоритский	−3,3	−2,0	−2,9	−0,8	0,8	−0,2	−1,8
Столинский	−2,4	−0,5	0,8	0,3	−0,1	0,7	−1,5
Жлобинский	−0,6	3,2	3,0	4,3	4,6	5,1	1,8
Мозырский	0,5	1,5	1,3	2,8	2,5	1,6	1,5
Наровлянский	−6,0	−2,1	−0,4	0,6	1,6	−0,5	−1,9
Солигорский	−2,2	−0,2	0,7	0,6	1,5	1,0	−0,7

*Примечание – * – составлено по [7].*

Анализируя данные таблицы 7, следует отметить разные причины процессов в конкретных административных районах. Так, например, если в Жлобинском, Мозырском, Солигорском и отчасти Кобринском районах основной причиной естественного прироста является наличие крупного промышленного центра, то в Столинском районе

на процесс репопуляции оказало влияние действие определенных религиозных структур, особенно протестантских направлений. В 2014–2015 гг. естественный прирост населения был зафиксирован и Наровлянском районе, наиболее пострадавшем от аварии на ЧАЭС. Этот феномен, по всей видимости, объясняется несколькими факторами – возрастной структурой населения, показателями урбанизации, социальной поддержкой молодых семей. Также следует заметить, что в некоторых городах региона (Брест, Пинск) процесс депопуляции населения не фиксировался даже в самые кризисные с точки зрения демографии годы. Для дальнейшего успешного социально-экономического развития региона требуется разработка комплекса мер по оптимизации демографической ситуации. В 2011 г. нами были разработаны направления развития трех районов Белорусского Полесья, некоторые из которых стали реализовываться на практике [5].

Заключение

1. Динамика численности населения Белорусского Полесья характеризуется снижением. Также наблюдается уменьшение удельного веса региона в общей численности населения Республики Беларусь.

2. Динамику численности населения в регионе в третьем десятилетии XXI в. В основном будет определять естественное движение населения, если на эту тенденцию не повлияет значительное изменение миграционных процессов, прогнозировать которые довольно сложно.

3. В регионе продолжается процесс урбанизации, для которого характерны меньшие показатели доли городского населения по сравнению с республиканскими, но интенсивность которого выше.

4. В ряде административных районов Белорусского Полесья наблюдается естественный прирост населения, причинами которого стали результаты социальной политики государства, а также влияние «демографических волн».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корженевич, С. В. Географические закономерности трансформации населения Белорусского Полесья : монография / С. В. Корженевич. – Пинск : ПолесГУ, 2014. – 125 с.

2. Кириенко, Е. Г. Социально-экономическая география Республики Беларусь : учеб. пособие / Е. Г. Кириенко. – Минск : Аверсэв, 2003. – 400 с.

3. Проблемы Полесья : сборник / С. Х. Будыка [и др.] ; АН БССР ; под общ. ред. С. Х. Будыки. – Минск : Наука и техника, 1972. – Вып. 1. – 452 с.

4. Белорусское Полесье: проблемы развития и размещения производительных сил / И. И. Трухан [и др.] ; под ред. С. И. Сидора. – Минск : Изд-во БГУ, 1983. – 175 с.

5. Корженевич, С. В. Географические закономерности трансформации населения Белорусского Полесья : дис. … канд. геогр. наук : 25.00.24 / С. В. Корженевич ; Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина. – Брест, 2011. – 183 л.

6. Антипова, Е. А. Регионы Беларуси: особенности демографического развития и трудовой потенциал сельской местности : монография / Е. А. Антипова, Б. А. Манак. – Минск : БГПУ, 2007. – 232 с.

7. Демография и статистика населения : учебник / И. И. Елисеева [и др.] ; под ред. И. И. Елисеевой. – М. : Финансы и статистика, 2006. – 688 с.

8. Вишневский, А. Г. Демографическая революция / А. Г. Вишневский. – М. : Статистика, 1976. – 240 с.

9. Регионы Республики Беларусь : стат. сб. : в 2 т. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2018. – Т. 1 : Регионы Республики Беларусь. Социально-экономические показатели / редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – 803 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 03.08.2019

Korjenevich S. V. **Present Day State and Prognosis of Demographic Situation Development on the Belarusian Polesye**

The article opens one of the most actual problems of Belarusian Polesye – the change of demographical situation of the fall of the number of people in the region. On the basis of the statistical data the territorial peculiarities of natural movement and the dynamics of birth and death of population on the region are analyzed. The article characterizes the peculiarities of migration processes of Belarusian Polesye, gives some prognostic indices of dynamics of migration movement of Polesye region, the dynamics of the growth of the population is shown.

УДК 556.047+556.332.52

А. Л. Шевченко[1], В. И. Осадчий[2], Д. В. Чарный[3]
[1]д-р геол. наук, ст. науч. сотрудник, проф. каф. гидрогеологии и инженерной геологии Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
[2]д-р геогр. наук, чл.-кор. НАН Украины, директор Украинского гидрометеорологического института НАН Украины
[3]д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник Института водных проблем и мелиорации НАН Украины
e-mail: shevch62@gmail.com

ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА, БАЛАНСА И РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОЛЕСЬЯ И ЛЕСОСТЕПИ УКРАИНЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Изложены результаты расчетов многолетнего подземного стока в р. Южный Буг методом конечных разностей. Сопоставление, в т. ч. с помощью множественного корреляционного анализа, динамики подземного стока с метеорологическими данными за 37 лет позволило выявить более значимую зависимость стока от среднемесячной температуры приземного слоя воздуха, чем от суммы атмосферных осадков, два многолетних периода с различными трендами, а также тесную связь поворотного для тренда экстремума (1997–1998) с аномальными изменениями температурного режима. На первом этапе проявилось положительное влияние повышения температуры зимнего периода на сток и ресурсы грунтовых вод, на втором, особенно начиная с 2010 г., на фоне уменьшения питания происходит истощение емкостных запасов и ресурсов. Также выявлена закономерная цикличность подземного стока, равная 7–8 годам, отличная от цикличности уровня грунтовых вод, и учащение за последние 10 лет чередования пиков минимального годового стока.

Введение

Заметное снижение уровней грунтовых вод (УГВ) происходит в Украине с 2013–2014 гг. Аномально низкие уровни наблюдались в 2015 г., что связывают с уменьшением количества осадков. Действительно, маловодные циклы – это обычное явление, и в истории мониторинговых наблюдений за УГВ не было необратимых процессов, тем более что подземные воды, в отличие от твердых полезных ископаемых, относятся к возобновляемым ресурсам. Резко неустановившийся режим поверхностного стока в последние два десятилетия вместе со снижением тренда атмосферных осадков наблюдается на всей планете и в основном связывается с катастрофическим уменьшением площади лесного покрова, вызванным не столько вырубками, сколько масштабными пожарами.

Однако безусловное наличие такого пока еще необратимого явления, как увеличение среднегодовой и сезонных температур, заставляет взглянуть на причины изменения режима грунтовых вод более системно. Есть серьезные основания полагать, что в связи с глобальными изменениями климата происходят глубокие зональные изменения, влекущие за собой не только уже известные изменения соотношения осадков и испарения [1; 2], режима поверхностного стока [2], смену растительного покрова, миграцию животных с юга на север, постепенные почвенные трансформации, но и смену инфильтрационного типа режима грунтовых вод Полесья и лесостепи на испарительно-инфильтрационный и испарительный. Настораживает, что рост температуры происходит неравномерно во времени, наблюдается повышение его интенсивности за последние десятилетия: если в 2001–2011 гг. увеличение температуры составляло 0,3 ^{o}C / 10 лет, то сейчас можно говорить о фоновой интенсивности порядка 0,45–0,54 ^{o}C / 10 лет [3; 4] и ее возрастании в крупных городах Украины – до 0,857 ^{o}C / 10 лет (Полтава) и выше [5].

Таким образом, в работе мы поставили цель установить характер и степень влияния повышения температуры на питание, разгрузку, колебания уровня грунтовых вод, а главное, на изменения запасов грунтовых вод и их стока в реки.

Материалы и методы исследования

На Украине с начала 50-х гг. прошлого века проводятся наблюдения за уровнем подземных вод по государственной сети мониторинга, которая к нашему времени, к сожалению, существенно сократилась. Так, по данным ГНПП «Геоинформ Украины» на 2018 г., в зоне достаточного и избыточного увлажнения, включающей Полесье и Карпаты, оставалось 70 скважин для наблюдений за УГВ в ненарушенных и слабонарушенных условиях, из которых 48 приходилось на четвертичный водоносный горизонт [6]. При этом с регулярным рядом наблюдений длительностью более 30 лет можно выбрать всего около десятка. Однако даже таких непрерывных хронологических рядов УГВ недостаточно для анализа причин и глубины фиксируемых изменений в режиме грунтовых вод. Необходимо точное количественное определение подземного стока. Для этого практически всегда используют метод расчленения гидрографов, большие погрешности которого обусловлены субъективным фактором. Значительно более достоверные результаты можно получить выполнив расчеты численным методом по известным гидродинамическим уравнениям неустановившейся фильтрации грунтовых вод, выраженным в конечных разностях [7; 8]. Впрочем, этот метод также имеет определенные ограничения, поскольку в случае значительной неоднородности гидрогеологических условий характеризует подземный сток лишь на локальном уровне. Для региональной представительности этого метода желательно, чтобы условия в бассейне были однородными, в первую очередь по водообеспеченности (в пределах одной климатической зоны) и по интенсивности дренирования. Иначе приходится обустраивать целый ряд створов для каждого типа условий.

Кроме этого, в ходе выбора объектов и фактических данных возникла еще одна проблема. Для определения многолетнего подземного стока в реки необходимы створы мониторинговых скважин, совмещенные с гидрометрическими постами. Оказалось, что таковых на Украине практически не существует, за исключением нескольких внутриведомственных створов и балансовых полигонов. Также необходимым условием являлось наличие вблизи створа метеостанции. Более всего отвечали требованиям скважины в г. Хмельник Винницкой области. Путем «переноса» ближайшего (около 1 км от скважин) гидропоста на р. Южный Буг в с. Лелитка, с поправкой на уклон потока реки, мы совместили его со створом из трех скважин в г. Хмельник.

Результаты исследований и их обсуждение

После расчетов подземного стока за 37 лет методом конечных разностей удалось построить и сопоставить хронологические графики изменений УГВ и подземного стока в реку (рисунок 1).

Если анализировать режим уровня грунтовых вод (рисунок 1а), то с 1989–1990 гг. прослеживается переход тренда в многоводную фазу, что характерно для большей части территории лесостепи и Полесья Украины. Хронологические графики более чем по 50 мониторинговым скважинам в разных климатических зонах и бассейнах отличаются по характеру кратковременных колебаний УГВ. Для выделения генеральных закономерностей и многолетних трендов построены разностные интегральные кривые, отражающие нарушения стационарности рядов данных, выражающиеся в многолетних

изменениях отношения отклонения модульного коэффициента (К-1) от среднего модульного коэффициента К = 1 к коэффициенту вариации Cv.

а

б

Рисунок 1. – Хронологические графики изменений УГВ по скважине № 5-5 (1951–2018) (а) и подземного стока в р. Южный Буг (м^3/год на метр длины реки) (1980–2016) с полиномиальной аппроксимацией (б) в г. Хмельник Винницкой области

На графике (рисунок 2) хорошо выделяются два длительных этапа в режиме УГВ – снижение и подъем, а также начало новой фазы снижения после экстремума в 2013 г. Из анализа климатических изменений следует, что начало подъема кривой (1989–1990) совпадает с первым переходом среднемноголетних температур февраля к положительным значениям [9]. После этого примерно до 1998–1999 гг. следует период интенсивного повышения зимних температур, чему сопутствует стремительный подъем интегральной кривой. С замедлением интенсивности роста температур зимнего периода и началом более интенсивного возрастания летних температур кривая заметно выполаживается, но в промежутке 2004–2007 гг. круто вздымается, что можно связать с повышенным количеством летних осадков: среднее значение за эти 4 года равно 342,7 мм при среднемноголетних летних осадках 265,4 мм, зимних – 114,6 мм, при среднемноголетних зимних – 107,6 мм.

Рисунок 2. – Разностная интегральная кривая среднегодовых уровней грунтовых вод по скважине № 5-5 (г. Хмельник) в бассейне р. Юж. Буг

Очевидно, что повышение зимних температур привело к учащению оттепелей, уменьшению либо отсутствию постоянного в течение зимы слоя промерзания в зоне аэрации и, как следствие, к небывалому увеличению инфильтрационного питания грунтовых вод в зимний период. В теплый период, возможно в связи с некоторым уменьшением средней скорости ветра [2], не происходило увеличения испарения с поверхности почвы и воды. По разным оценкам, расчетное среднегодовое инфильтрационное питание на Украинском Полесье в период 2000–2012 гг. составляло около 47 % (295 мм) от среднегодового количества осадков (в Киевском Полесье это 631 мм), в то время как в 1956–1992 гг. оно не превышало 25 % [10]. Эти явления и процессы способствовали увеличению УГВ, ресурсов грунтовых вод и подземного стока в реки. Так, на рассматриваемом участке, в верхней части бассейна р. Южный Буг, средние зимние УГВ за период с 1990 по 2012 г. были на 67 см выше по сравнению со средними зимними уровнями 1950–1989 гг. В связи с этим произошли также изменения и в динамике поверхностного стока: до 2006–2007 гг. увеличился меженный сток рек [11; 12] при уменьшении паводкового стока [9], а годовой сток вырос на 10–15 % от среднемноголетнего [13].

В распределении подземного стока по сезонам проявилась некоторая асинхронность колебаний суммарных значений сезонного удельного стока (рисунок 3), особенно заметная в промежутке 1990–2004 гг. Зимний подземный сток отличается наименьшей амплитудой колебаний, а колебания летнего стока имеют наибольшую многолетнюю амплитуду. Заметна также конкуренция, т. е. разнонаправленные колебания между стоком зимнего и весеннего периодов, что может свидетельствовать о «перехвате» части талого весеннего поверхностного стока зимним подземным стоком во время оттепелей и более позднее (июль – октябрь) его поступление в реку.

Рисунок 3. – Хронологические графики посезонного удельного подземного стока в р. Южный Буг в створе г. Хмельник

После 2007 г. количество осадков теплого периода начало постепенно уменьшаться, что отобразилось на выполаживании интегральной кривой УГВ (рисунок 2). С этим годом связывают также начало понижения стока летне-осенней межени по всем рекам бассейна Южного Буга [11]. Среднегодовые температуры продолжили еще более интенсивно повышаться, однако теперь уже преимущественно за счет температур теплого периода [2] и дневного времени. Увеличение продолжительности жарких бездождевых периодов, рост объемов испарения привели к уменьшению питания грунтовых вод и снижению их уровня, которое наиболее резко проявилось в 2013–2019 гг. (рисунки 1а, 2). Максимальные отклонения от среднемноголетних (нормативных) уровней (на 43–53 %) прослеживались в лесостепной зоне именно в жаркие месяцы – с мая по август. Режим грунтовых вод начал трансформироваться с инфильтрационно-испарительного в испарительный. В то же время средние зимние УГВ продолжают расти: за период 2013–2018 гг. они были на 14 см выше, чем за 1990–2012 гг.

2014–2015 гг. отличались аномально низкой суммой годовых осадков (524,6 и 398,0 мм). Тем не менее, согласно расчетам, в 2014 г. происходил максимальный за все годы подземный сток – в значительной степени за счет летнего стока, когда перепад уровней грунтовых и поверхностных вод был максимальным. Это привело к истощению емкостных запасов грунтовых вод, поскольку сопровождалось значительным падением УГВ в том же и следующем за ним 2015 г. (рисунок 1а) – соответственно до 72,3 и 93 % обеспеченности, что в итоге привело к значительному уменьшению расходов грунтовых вод в 2015–2016 гг. (рисунок 1б). Таким образом, рост подземного стока в маловодные периоды можно объяснить созданием значительных градиентов напора между уровнями на водоразделе, резкое снижение которых сдерживается фильтрационным сопротивлением, и «просевшими» УГВ в зоне разгрузки при быстром и существенном снижении уровня воды в реке.

В последние годы (2014–2019) УГВ снижаются даже при увеличении суммы годовых осадков [6]. Если снижение уровней грунтовых и подземных вод в отдельных районах лесостепи и Полесья еще можно связывать с техногенным влиянием, как то: мощные городские водозаборы, водопонижение в Хотиславском карьере (активная фаза с 2009 г.) или спуск пруда-охладителя в зоне Чернобыльской АЭС (с 2014 г.), то снижение уровней в напорных эксплуатационных водоносных горизонтах при существен-

ном (на порядок) уменьшении водоотбора (рисунок 4), можно объяснить только значительным уменьшением их естественного питания за счет грунтовых вод.

Рисунок 4. – Динамика уровня напорных межпластовых вод в условиях уменьшения водоотбора и суммы годовых осадков на Збручанском месторождении подземных минеральных вод

Для Волынского Полесья проведены расчеты величины испарения по известным методам Пенмана – Монтейта и М. М. Иванова [14], из которых следует, что в последние годы происходит увеличение величины испарения, особенно в 2014–2015 гг. (рисунок 5), что, безусловно, должно отразиться на водном балансе и ресурсах данного региона.

Рисунок 5. – Расчетная динамика испарения на Волынском Полесье за период с 2010 по 2016 г. (по данным А. А. Дятла, 2019)

Для расходов подземного стока проявилась довольно четкая 7–8 летняя цикличность (рисунок 1 б). При помощи спектрального анализа методом скоростных преобра-

зований Фурье мы получили три вариации периодичности многолетних колебаний, в месяцах: 12, 49,3 (4 года) и 88,8 (7,4 года). Вейвлет-анализ выделил цикличность, равную 45,8 месяца и 7,8 года. Это отличает режим стока от режима УГВ, для которого более характерна 10–11-летняя и 24–25-летняя цикличность. В целом с 1980 по 2013 г. графики УГВ и подземного стока довольно схожи (рисунок 1): в обоих случаях просматриваются два продолжительных этапа, однако их временные границы несколько отличаются: для УГВ фаза высоких уровней (< 50% обеспеченности) длилась с 1989 по 2013 г., а для подземного стока – с 1988 по 2014 г., при этом период с 1999 по 2016 г. отличается замедлением интенсивности роста стока и резкими его колебаниями. Поэтому для дальнейшего анализа мы выделили два периода: 1980–1998 гг. – монотонное увеличение подземного стока (особенно в период 1985–1997 гг.), что можно увязать с увеличением инфильтрационного питания, и 1999–2016 гг., – с невыраженной общей тенденцией, однако наличием двух максимальных за весь период наблюдений годовых расходов (2005, 2014 гг.). На втором этапе также прослеживается уменьшение временных интервалов наступления минимумов стока с 6 до 2–3 лет.

Тренды многолетних изменений УГВ, подземного стока, расходов реки, осадков и температуры (рисунок 6) выявили наиболее высокую близость между направлениями изменений УГВ, подземного стока в реку и температурой.

Далее мы разделили тренды согласно выделенным этапам. Благодаря этому удалось увидеть слабый рост осадков до 1998 г. и более заметное уменьшение их количества на втором этапе (рисунок 7), незначительное снижение расхода реки на первом этапе и более ощутимое (примерно на 11 м^3/с) на современном, интенсивное увеличение подземного стока до 1998 г. и очень слабое после (рисунок 7). И все это на фоне достаточно стабильного (без изменения интенсивности) повышения температуры (на 2 ^{o}С за 37 лет).

а *б*

Рисунок 6. – Многолетние тренды изменения среднемесячного уровня грунтовых вод (УГВ) по скважине № 5-5 на фоне изменения среднемесячных температур (*а*) и месячной суммы осадков (*б*) по метеостанции Хмельник

Рисунок 7. – Линейные тренды изменений месячной суммы осадков (нижняя линия) и суммарного месячного удельного подземного стока (верхние тренды), выделенные для двух этапов различного влияния глобального потепления на подземный сток 1980–1998 и 1999–2016 гг.

После сопоставления линейных трендов многолетних изменений годового подземного стока, среднемесячных УГВ и суммарных месячных осадков за многолетний период (рисунки 6, 7) был сделан вывод, что увеличение расходов подземного стока не компенсируется питанием за счет атмосферных осадков, количество которых уменьшается. Если тенденция уменьшения суммы осадков (рисунок 7) будет сохраняться в дальнейшем, это неминуемо приведет к снижению объемов подземного стока в реку. Длительное сохранение данной тенденции несет реальную угрозу постепенного количественного истощения природных ресурсов грунтовых, а за ними и нижележащих межпластовых вод, а также речного стока (рисунок 8).

Рисунок 8. – Линейные тренды по многолетним данным расходов подземного стока в р. Южный Буг (восходящий тренд) и поверхностного речного стока (нижний тренд)

Для всего расчетного периода (1980–2016) и для двух выделенных этапов был также выполнен множественный корреляционный анализ – последовательно между УГВ и подземным стоком с одной стороны и расходом реки, осадками и температурой – с другой. Причем мы сознательно поместили вместе с независимыми предикторами зависимый от подземного стока показатель – расход речного стока, поскольку вначале, до анализа трендов, предполагали, что его близость к подземному стоку и УГВ будет максимальной и продемонстрирует классическую (по Г. М. Каменскому) принадлежность режима грунтовых вод по ближайшей к реке скважине к прибрежному типу. Однако результаты оказались несколько неожиданными (рисунок 9). Как и положено для данного типа режима, расход реки, как и ее уровни, доминирует над осадками, однако на первое место вышла температура воздуха. Неожиданно, что именно температура, а не снижение количества осадков явилась определяющим фактором для подземного стока на втором этапе. Вероятно, отрицательное ее влияние (рисунок 7) объясняется ростом испарения осадков теплого периода, которые не поступают в грунтовые воды, а также увеличением критической глубины, с которой начинается испарение с зеркала грунтовых вод.

Отсюда становится понятным, почему подземный и речной сток изменяются в противоположных направлениях (рисунок 8). Очевидно, что доминирующее влияние на них оказывают разные режимообразующие факторы. На подземный сток имеет большее влияние температура (рисунок 9): с ее ростом происходит увеличение зимнего питания и общего годового стока грунтовых вод; замедление роста зимних температур и увеличение интенсивности роста температуры летнего периода, сопровождающееся уменьшением суммы годовых осадков, ведет к снижению питания и, соответственно, уровней и стока грунтовых вод в реки. Речной сток, при том что доля поверхностного стока в его балансе выше, чем подземного (примерно 60 и 40 %), имеет более тесную зависимость от атмосферных осадков (рисунки 7, 8).

Кроме того, на уменьшении поверхностного стока сказывается конкуренция между ним и стоком грунтовых вод за осадки зимнего периода: подземный сток растет за счет перехвата во время зимних оттепелей части талого весеннего поверхностного стока. При этом часть влаги, перетекая в нижележащие водоносные горизонты, залегающие ниже базиса эрозии, не поступает в реки.

а *б*

Рисунок 9. – Диаграммы значений стандартизованных коэффициентов переменных, демонстрирующие связь между подземным стоком и осадками, температурой, расходом р. Южный Буг: а – за период 1980–1998 гг.; б – за период 1999–2016 гг.

Если сравнивать характер изменений баланса грунтовых вод в условиях повышения среднегодовой температуры до 1,9–2,0 °С, при возрастании темпов потепления с изменениями во время осушительных мелиораций, то снижение УГВ в первом случае не сопровождается увеличением инфильтрационного питания. С 2013 г. в балансе грунтовых вод происходит стремительное увеличение расходных составляющих, которые не компенсируются достаточным питанием, поэтому общий баланс отрицательный.

Величина потерь на испарение с УГВ со временем стабилизируется, что связано со снижением УГВ ниже критического уровня. Значительно более существенная зависимость УГВ от осадков в периоды их отсутствия, чем в периоды выпадения, как и тенденция к увеличению глубины влияния испарения в полесской и лесостепной зонах, свидетельствует об изменении инфильтрационного типа режима на инфильтрационно-испарительный и испарительный.

Заключение

Таким образом, выполненное нами комплексирование данных (за 37 лет) гидрометрических и гидрогеологических мониторинговых наблюдений впервые позволило получить количественные более точные, чем при расчленении гидрографов или применении гидрометрических методов, значения подземного стока в реку (р. Южный Буг).

Из трех выявленных вариаций цикличности подземного стока наиболее выдержанная близка 8 годам. На снижение темпов роста подземного стока в реку решающее влияние оказало уменьшение интенсивности роста зимних температур с 1997–1998 гг. В связи с этим в динамике подземного стока выделены два периода, демонстрирующие положительное и отрицательное влияние температуры. Во время первого (1980–1998) сток грунтовых вод в реку неуклонно возрастал благодаря увеличению инфильтрационного питания холодных сезонов. В течение второго периода (1999–2019) значимость температуры выросла, что выражается в заметном падении УГВ и подземного стока в реки в связи с увеличением интенсивности роста температур теплого периода, величины испарения и критической глубины залегания зеркала грунтовых вод. Снижается также питание глубоких водоносных горизонтов, что проявляется в падении их уровней.

Амплитуда между минимальным и максимальным годовым подземным стоком за последние 20 лет существенно выросла, поэтому этап после 1998 г. можно назвать периодом возрастающей неравномерности подземного стока, во время которого среднемноголетнее количество осадков снижается, увеличение расходов подземного стока не компенсируется инфильтрационным питанием и происходит истощение ресурсов подземных вод. На фоне увеличивающегося влияния подземного стока на поверхностный такая неравномерность приводит к неравномерности и постепенному снижению речного стока.

Влияние температуры на подземный сток более значимо, чем осадков и гидрологического фактора (расхода реки). Согласно статистическому анализу, на втором этапе температура воздуха остается единственным определяющим фактором (роль двух остальных упала ниже предела значимости). Это может свидетельствовать о глубоких зональных изменениях в режиме УГВ и его классификационной трансформации – от инфильтрационного и речного типа к испарительному.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Grope 1 to the Third Assessment Report [2007] UNEP/WMO, 250.

2. Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень / В. І. Осадчий [та ін.]. – Київ : Ніка-Центр, 2013. – 306 с.

3. Оценка изменений климата и их влияние на природную среду и хозяйственную деятельность на территории Украинского Полесья / В. И. Лялько [и др.] // Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск 14–17 сент. 2016 г. : в 2 т. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 390–393.

4. Shevchenko, O. Global challenges to the system of state hydrogeological monitoring [Electronic resource] / O. Shevchenko, V. Bublias' // Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: 12-th International Scient. Conf., Kyiv 13–16 November 2018. – (CD-ROM) Extended Abstracts. Materials\Monitoring and modelling of natural hazards. Monitoring. – 2018_eng.pdf. EAGE.

5. Шевченко, А. Л. Режим, водообмен и ресурсы подземных вод Полесья и Лесостепи в контексте глобальных изменений климата / А. Л. Шевченко, В. А. Нестеровский, В. И. Осадчий // Актуальные проблемы наук о Земле. Исследования трансграничных регионов : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф., Брест 12–14 сент. 2019 г. – Брест, 2019. – Ч. 1. – С. 33–37.

6. Стан підземних вод України : щорічник. – Київ : ДНВП ГЕОІНФОРМ України, 2018. – 122 с.

7. Гидродинамические основы изучения режима грунтовых вод и его изменение под влиянием искусственных факторов (метод конечных разностей) / Г. Н. Каменский [и др.] // Тр. Лаб. гидрогеол. проблем АН СССР. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 26. – 190 с.

8. Куделин, Б. И. Гидрогеологический анализ и методы определения подземного питания рек / Б. И. Куделин // Тр. Лаб. гидрогеол. проблем им. Ф. П. Саваренского АН СССР. – 1949. Т. 5. – С. 179.

9. Шакірзанова, Ж. Р. Гідрометеорологічні чинники і характеристики весняних водопіль в басейні р. Південний Буг в сучасних кліматичних умовах / Ж. Р. Шакірзанова, А. О. Казакова // Вісн. Одес. держ. екол. ун-ту. – 2015. – № 19. – С. 100–105.

10. Ситников, А. Б. Гидрогеологическая станция «Феофания»: многолетние исследования и результаты / А. Б. Ситников, Ю. Г. Головченко, К. Д. Ткаченко. – Київ : Ин-т геол. наук НАН Украины, 2003. – 200 с.

11. Жовнір, В. В. Багаторічні коливання характеристик стоку води річок басейну Південного Бугу в період літньо-осінньої межені / В. В. Жовнір // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2019. – № 3 (54). – С. 44–46.

12. Гідролого-генетичний аналіз часових рядів мінімального стоку річок в зоні недостатньої водності України за сучасних кліматичних умов / Л. В. Кущенко [та ін.] // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2019. – № 3 (54). – С. 51–53.

13. Изменения режима и подземного стока рек европейской территории России под влиянием нестационарного климата / Р. Г. Джамалов [и др.] // Ресурсы подземных вод. Современные проблемы изучения и использования : материалы междунар. науч. конф., Москва, 13–14 мая 2010. – М. : МГУ им. Ломоносова : МАКС Пресс, 2010. – С. 83–93.

14. Дятел, О. О. Формування водообміну та його прогнозування в умовах техногенезу на меліорованих територіях Волинського Полісся : автореф. … дис. канд. техн. наук : 06.01.02 / О. О. Дятел. – Київ, 2019. – 22 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 22.10.2019

Shevchenko A. L., Osadchy V. I., Charny D. V. **Changes of the Regime, Balance and Resources of Underground Waters of Polesye and Forest-Steppe of Ukraine under the Influence of Global Warming**

The paper presents the results of calculations of long-term underground flow into the river South Bug using the finite difference method. Comparison, incl. using multiple correlation analysis, the dynamics of the underground runoff with meteorological data for 37 years revealed a more significant dependence of the runoff on the average monthly temperature of the surface air layer than on the sum of atmospheric precipitation, two longterm periods with different trends, as well as the close connection of the extremum turning for the trend (1997–1998) with abnormal changes in the temperature regime. At the first stage, a positive effect of increasing winter temperature on the runoff and ground water resources was manifested, at the second, especially since 2010, amid the decrease in nutrition, capacitive reserves and resources are depleted. The regular cycle of underground runoff equal to 7–8 years, different from the cyclical level of groundwater, and the increase in the last 10 years of alternating peaks of the minimum annual flow were also revealed.

ПАМЯТИ УЧЕНОГО

Геологическая наука Беларуси понесла невосполнимую утрату. Ушел из жизни **Александр Кириллович Карабанов** (25.10.1952 – 03.08.2019) – выдающийся белорусский ученый в области региональной геологии, новейшей тектоники и геодинамики, доктор геолого-минералогических наук (2003), профессор (2011), член-корреспондент (2004), академик Национальной академии наук Беларуси (2014).

После окончания в 1974 г. географического факультета Белорусского государственного университета А. К. Карабанов был направлен в аспирантуру Института геохимии и геофизики Академии наук БССР, по окончании которой с 1977 по 1979 г. работал младшим научным сотрудником, старшим научным сотрудником, а с 1992 г. – заведующим лабораторией. С 2008 г. его трудовая деятельность была связана с Институтом природопользования Национальной академии наук Беларуси, где он работал сначала заведующим лабораторией геодинамики и палеогеографии, а с 2009 г. – директором Института.

А. К. Карабанов разработал концепцию и создал теоретическую модель новейшей и современной геодинамики территории Беларуси и сопредельных регионов Восточно-Европейской платформы, предложил методику составления неотектонических карт на основе картографирования структурно-формационных комплексов фундамента платформенного чехла. Эти научные труды имеют большое значение для практики проведения геолого-съемочных и геологоразведочных работ, обоснования выбора оптимальных площадок для строительства ответственных инженерных сооружений, оценки новейшей и современной тектонической активности разрывных нарушений в связи с задачами обеспечения безопасной эксплуатации и планирования горных работ.

Под руководством А. К. Карабанова выполнен комплекс инженерно-геологических работ по выбору площадки для размещения Белорусской атомной электростанции

и оценке ее воздействия на окружающую среду, разработан прогноз и основы формирования стратегии освоения минерально-сырьевых ресурсов Беларуси. Разработана тектоно-неогеодинамическая модель, выявлены закономерности глубинного строения и геодинамики земной коры и литосферы Беларуси и сопредельных регионов, составлена тектоническая карта Беларуси масштаба 1 : 500 000, на которой уточнены границы региональных тектонических структур, проведена типизация и определена позиция платформенных и доплатформенных разломов, выполнено неотектоническое районирование территории.

А. К. Карабанов – автор свыше 300 научных работ, в том числе 13 монографий. Результаты его исследований получили признание научной общественности как в Беларуси, так и за ее пределами. За цикл работ «Разломы и линеаменты земной коры Беларуси: теоретические и прикладные аспекты» он удостоен премии Национальной академии наук Беларуси за 2008 г.

А. К. Карабанов вел большую научно-организационную работу по развитию наук о Земле, по решению проблем поиска, разведки и добычи полезных ископаемых, природопользования и охраны окружающей среды. Будучи директором Института природопользования НАН Беларуси, он являлся организатором и научным руководителем ряда государственных программ разного уровня: Государственной программы социально-экономического развития и комплексного использования природных ресурсов Припятского Полесья (2010–2015), государственной программы «Мониторинг полярных районов Земли и обеспечение деятельности арктических и антарктических экспедиций» (2011–2015), государственных программ научных исследований «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал» (2011–2015), «Природопользование и экология» (2016–2020).

Александр Кириллович выполнял обязанности главного редактора научного журнала «Природопользование», был членом редколлегий пяти зарубежных научных журналов. Много внимания уделял педагогической деятельности, являясь руководителем филиала кафедры динамической геологии географического факультета Белорусского государственного университета.

Награжден медалью «За трудовую доблесть» (1973), медалью Франциска Скорины (2018), нагрудным знаком Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь «Ганаровы эколаг» за высокий профессионализм и неоценимый личный вклад в дело рационального природопользования и охраны окружающей среды (2019).

А. К. Карабанов был многогранным, широко эрудированным человеком, отлично владел немецким и английским языками, отличался любознательностью и оптимизмом, простотой и отзывчивостью. Обладая поистине широкой душой и добрым сердцем, он бескорыстно помогал многим людям науки словом и делом: вдохновлял молодых людей на первые свершения, поддерживал опытных сотрудников в их начинаниях, бережно заботился о старшем поколении белорусских ученых.

Память об Александре Кирилловиче Карабанове навсегда сохранится в истории развития науки и в наших сердцах.

М. Богдасаров, доктор геолого-минералогических наук, профессор,
член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
заведующий кафедрой географии и природопользования
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Да ведама аўтараў

Рэдкалегія зборніка навуковых прац разглядае рукапісы толькі тых артыкулаў, якія адпавядаюць навуковаму профілю выдання, нідзе не апублікаваныя і не перададзеныя ў іншыя рэдакцыі.

Матэрыялы прадстаўляюцца на беларускай ці рускай мове ў двух экземплярах аб'ёмам ад 0,35 да 0,5 друкаванага аркуша, у электронным варыянце – у фармаце Microsoft Word for Windows (*.doc; *.rtf) і павінны быць афармлены ў адпаведнасці з наступнымі патрабаваннямі:

- папера фармата А4 (21×29,7 см);
- палі: зверху – 2,8 см, справа, знізу, злева – 2,5 см;
- шрыфт – гарнітура Times New Roman;
- кегль – 12 pt.;
- міжрадковы інтэрвал – адзінарны;
- двукоссе парнае «...»;
- абзац: водступ першага радка 1,25 см;
- выраўноўванне тэксту па шырыні.

Максімальныя лінейныя памеры табліц і малюнкаў не павінны перавышаць 15×23 см або 23×15 см. Усе графічныя аб'екты, якія ўваходзяць у склад аднаго малюнка, павінны быць згрупаваны паміж сабой. Фатаграфіі ў друк не прымаюцца. Размернасць усіх велічынь, якія выкарыстоўваюцца ў тэксце, павінна адпавядаць Міжнароднай сістэме адзінак вымярэння (СВ). Пажадана пазбягаць скарачэнняў слоў, акрамя агульнапрынятых. Спіс літаратуры павінен быць афармлены паводле Узораў афармлення бібліяграфічнага апісання ў спісе крыніц, якія прыводзяцца ў дысертацыі і аўтарэфераце, зацверджаных загадам Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь ад 25.06.2014 № 159 у рэдакцыі загада Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь ад 08.09.2016 № 206. Спасылкі на крыніцы ў артыкуле нумаруюцца адпаведна парадку цытавання. Парадкавыя нумары спасылак падаюцца ў квадратных дужках (напрыклад, [1, с. 32], [2, с. 52–54]). Не дапускаецца выкарыстанне канцавых зносак.

Матэрыял уключае наступныя элементы па парадку:

- індэкс УДК (выраўноўванне па левым краі);
- ініцыялы і прозвішча аўтара (аўтараў) (выдзяляюцца паўтлустым шрыфтам і курсівам; выраўноўванне па цэнтры);
- звесткі пра аўтара (навуковая ступень, званне, пасада);
- назва артыкула (друкуецца вялікімі літарамі без пераносаў; выраўноўванне па цэнтры);
- анатацыя ў аб'ёме ад 100 да 150 слоў на мове артыкула (курсіў, кегль – 10 pt.);
- звесткі аб навуковым кіраўніку (для аспірантаў і саіскальнікаў) указваюцца на першай старонцы артыкула ўнізе;
- асноўны тэкст, структураваны ў адпаведнасці з патрабаваннямі ВАКа да навуковых артыкулаў, якія друкуюцца ў выданнях, уключаных у Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў (Уводзіны з пастаўленымі мэтай і задачамі; Асноўная частка, тэкст якой структуруецца падзагалоўкамі (назва раздзела «Асноўная частка» не друкуецца); Заключэнне, у якім сцісла сфармуляваны асноўныя вынікі даследавання, указана іх навізна);
- спіс выкарыстанай літаратуры;
- рэзюмэ на англійскай мове (курсіў; да 10 радкоў, кегль – 10 pt.): назва артыкула, прозвішча і ініцыялы аўтара/аўтараў, тэзісны пераказ зместу артыкула; у выпадку калі аўтар падае матэрыял на англійскай мове, рэзюмэ – на рускай ці беларускай.

Да рукапісу артыкула абавязкова дадаюцца:

- звесткі пра аўтара на беларускай мове (прозвішча, імя, імя па бацьку поўнасцю, вучоная ступень і званне, месца працы (вучобы) і пасада, паштовы і электронны адрасы для перапіскі і кантактныя тэлефоны);
- выпіска з пратакола пасяджэння кафедры, навуковай лабараторыі ці ўстановы адукацыі, дзе працуе/вучыцца аўтар, завераная пячаткаю, з рэкамендацыяй артыкула да друку;
- рэцэнзія знешняга ў адносінах да аўтара профільнага спецыяліста з вучонай ступенню, завераная пячаткаю;
- экспертнае заключэнне (для аспірантаў і дактарантаў).

Рукапісы, афармленыя не ў адпаведнасці з выкладзенымі правіламі, рэдкалегіяй не разглядаюцца.

Аўтары нясуць адказнасць за змест прадстаўленага матэрыялу.

Карэктары *А. Г. Хадыева, Л. М. Калілец*
Камп'ютарнае макетаванне *С. М. Мініч, Г. Ю. Пархац*

Падпісана ў друк 30.12.2019. Фармат 60×84/8. Папера афсетная.
Гарнітура Таймс. Рызаграфія. Ум. друк. арк. 15,35. Ул.-выд. арк. 8,19.
Тыраж 50 экз. Заказ № 548.
Выдавец і паліграфічнае выкананне: УА «Брэсцкі дзяржаўны ўніверсітэт імя А. С. Пушкіна».
Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы,
распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/55 ад 14.10.2013.
224016, г. Брэст, вул. Міцкевіча, 28.