

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

Вучоныя запіскі

Брэсцкага ўніверсітэта

Зборнік навуковых прац

Выпуск 9

*Частка 2
Прыродазнаўчыя навукі*

Брэст • 2013

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

Proceedings

of Brest University

Collection of scientific works

Issue 9

Part 2
Natural Sciences

Brest • 2013



ЗМЕСТ

МАТЭМАТЫКА

Матысик О.В., Савчук В.Ф. Об апостериорном выборе параметра регуляризации в явном методе итераций решения некорректных задач с приближенным оператором7

Трофимук А.А., Ткач С.Н. О влиянии фиттинговых факторов на строение группы..... 16

ФІЗІКА

Плетюхов В.А., Андрусевич П.П. Внутренняя симметрия дираковских и дирак-кэлеровских полей в пространстве 2+123

ХІМІЯ

Ступень Н.С. Композиционные вяжущие, устойчивые в агрессивных средах.....45

БІЯЛОГІЯ

Бойко В.И. Лесная и кустарниковая растительность республиканского заказника «Средняя Припять»56

Гайдук В.Е., Блоцкая Е.С., Абрамова И.В. Распространение, биотопическое распределение, суточные и сезонные биоритмы земноводных (*Amphibia*) в юго-западной Беларуси 71

Головач М.В. Адаптационные возможности сердечно-сосудистой системы школьников 9–10 лет, проживающих в районе радионуклидного загрязнения..... 84

Жигар М.П., Матусевич Н.М. Строение черешков кустарниковых Spiraeoideae как таксономический признак.....96

Маргысюк И.А. Взаимосвязь экологических и эволюционных понятий и необходимость их параллельного формирования в курсе ботаники..... 101

Тарасюк А.Н. Температурная индукция рекомбинации и генетическая адаптация высших организмов 107

НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ

Корженевич С.В. Регион как объект экономико-географических исследований..... 123

Тарихазер С.А. Особенности развития экзодинамических процессов в азербайджанской части Большого Кавказа (на примере северо-восточного склона) 132

Токарчук С.М., Романюк С.С. Электронный природоохранный атлас Ивановского района 141

Звесткі аб аўтарах 150

Proceedings

of Brest University

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS



2013 • Issue 9 • Part 2

INDEX

MATHEMATICS

- Matysik O.V., Savchuk V.F.** On Aposteriori Choice of Regularization Parameter in Explicit Method of Iterations Incorrect Problems with Approximately Operator.....7
- Trofimuk A.A., Tkach S.N.** On Influence of the Fitting Factors on Structure of the Group16

PHYSICS

- Pletyukhov V.A., Andrushevich P.P.** Internal Symmetries of the Dirac and Dirac-Kähler Fields23

CHEMISTRY

- Stupen N.S.** Composite Binders, Stability in Aggressive Environments45

BIOLOGY

- Boiko V.I.** Forest and Scrub Vegetation of the National Reserve «Middle Pripyat»56
- Gaiduk V.E., Blockaja E.S., Abramova I.V.** Dissemination, Habitat Distribution, Abundance, Diurnal and Seasonal Biorhythms Amphibians in the South-Western Belarus71
- Halavach M.V.** Adaptation the Possibility of Cardiovascular System Students 9–10 Years Living in the Area of Radionuclide Contamination.....84
- Zhigar M.P., Matoussevitch N.M.** As Petioles of Shrubby Spiraeoideae Taxonomic Characters96
- Martysuk I.A.** The Relationship of Ecological and Evolutionary Concepts and the Need for a Parallel Formation in the Course of Botany101
- Tarasyuk A.N.** Temperature Induction of Recombination and Genetical Adaptation of Higher Organisms107

EARTH SCIENCES

- Korjenevich S.V.** Region as Object Economic-Geographical Research.....123
- Tarikhazer S.A.** Features of Development Exodynamic Processes in Azerbaijan Part of Major Caucasus (on the Example of the North-Eastern Slope)132
- Tokarchuk S.M., Romanjuk S.S.** Electronic Nature Protection Atlas of Ivanovo District141

-
-
- Information about the authors150
-
-



УДК 519.6+517.983.54

О.В. Матысик, В.Ф. Савчук

ОБ АПОСТЕРИОРНОМ ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ В ЯВНОМ МЕТОДЕ ИТЕРАЦИЙ РЕШЕНИЯ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ С ПРИБЛИЖЕННЫМ ОПЕРАТОРОМ

В гильбертовом пространстве предлагается явный метод итераций решения операторных уравнений первого рода с неотрицательным самосопряженным и несамосопряженным ограниченным оператором. Доказана сходимость метода в случае апостериорного выбора числа итераций в исходной норме гильбертова пространства, в предположении, что погрешности имеются не только в правой части уравнения, но и в операторе. Получены оценка погрешности метода и оценка для апостериорного момента останова.

В статье предлагается итерационный метод явного типа решения некорректных задач. Случай приближенной правой части уравнения и точного оператора для рассматриваемого метода изучен в работе [1]. Там исследован априорный и апостериорный выбор параметра регуляризации, изучен случай неединственного решения задачи, доказана сходимость метода в энергетической норме. Априорный выбор числа итераций для изучаемого в данной статье метода в случае приближенного оператора исследован в [2]. Сравнение предлагаемого метода с хорошо известным методом простой итерации $x_{n+1} = x_n + \alpha(y - Ax_n)$, $x_0 = 0$ [3–5] показывает, что по мажорантным оценкам погрешности эти методы одинаковы. Однако предлагаемый метод имеет преимущество по сравнению с методом простой итерации в следующем: выполнение здесь одного шага итераций равносильно выполнению двух шагов по методу простой итерации.

В данной статье продолжено изучение предлагаемого метода. Доказана его сходимость в случае апостериорного выбора числа итераций, и получены оценки погрешности метода и оценки момента останова в предположении, что оператор задан приближенно.

1. Постановка задачи

Пусть H и F – гильбертовы пространства и $A \in \mathcal{L}(H, F)$, т. е. A – линейный непрерывный оператор, действующий из H в F . Предполагается, что нуль принадлежит спектру оператора A , но не является его собственным значением. Решается уравнение

$$Ax = y. \quad (1)$$

Задача отыскания элемента $x \in H$ по элементу $y \in F$ является некорректной, так как сколь угодно малые возмущения в правой части y могут вызывать сколь угодно большие возмущения решения.

Предположим, что точное решение $x^* \in H$ уравнения (1) существует и является единственным. Будем искать его с помощью итерационного процесса

$$x_{n+1} = (E - \alpha A)^2 x_n + 2\alpha y - \alpha^2 Ay, \quad x_0 = 0 \quad (2)$$



где E – тождественный оператор, α – итерационный шаг.

Считаем, что оператор A и правая часть y уравнения (1) заданы приближённо, т. е. вместо y известно приближение y_δ , $\|y - y_\delta\| \leq \delta$, а вместо оператора A известен оператор A_η , $\|A - A_\eta\| \leq \eta$. Предполагаем, что $0 \in Sp(A_\eta)$, $Sp(A_\eta) \subseteq [0, M]$. Тогда метод (2) примет вид

$$x_{(n+1)(\eta, \delta)} = (E - \alpha A_\eta)^2 x_{n(\eta, \delta)} + 2\alpha y_\delta - \alpha^2 A_\eta y_\delta, \quad x_{0(\eta, \delta)} = 0. \quad (3)$$

Докажем сходимость метода (3) в случае апостериорного выбора параметра регуляризации для решения уравнения $A_\eta x = y_\delta$, где оператор A_η и правая часть уравнения заданы приближённо: $\|A_\eta - A\| \leq \eta$, $\|y - y_\delta\| \leq \delta$. Подобные вопросы изучались в [3], но только для других методов. Считаем, что нуль не является собственным значением оператора A_η , но принадлежит его спектру.

2. Правило останова по невязке

Зададим уровень останова $\varepsilon > 0$ и определим момент m останова итерационного процесса (3) условием

$$\left. \begin{aligned} &\|A_\eta x_{n(\delta, \eta)} - y_\delta\| > \varepsilon, \quad (n < m), \\ &\|A_\eta x_{m(\delta, \eta)} - y_\delta\| \leq \varepsilon, \end{aligned} \right\} \varepsilon = b(\delta + \|x^*\| \eta), \quad b > 1. \quad (4)$$

Предположим, что при начальном приближении $x_{0(\delta, \eta)}$ невязка достаточно велика, больше уровня останова ε , т. е. $\|A_\eta x_{0(\delta, \eta)} - y_\delta\| > \varepsilon$. Покажем возможность применения правила (4) к методу (3).

3. Случай самосопряжённых неотрицательных операторов

Пусть $H = F$, $A = A^* \geq 0$, $A_\eta = A_\eta^* \geq 0$, $Sp(A_\eta) \subseteq [0, M]$, $0 < \eta \leq \eta_0$. Итерационный метод (3) запишем в виде: $x_{n(\eta, \delta)} = g_n(A_\eta) y_\delta$, где $g_n(\lambda) = \lambda^{-1} [1 - (1 - \alpha \lambda)^{2n}]$. В [1] получены следующие условия для функций $g_n(\lambda)$:

$$\sup_{0 \leq \lambda \leq M} |g_n(\lambda)| \leq \gamma_n, \quad \gamma = 2\alpha, \quad 0 < \alpha < \frac{2}{M}, \quad n > 0; \quad (5)$$

$$\sup_{0 \leq \lambda \leq M} \lambda^s |1 - \lambda g_n(\lambda)| \leq \gamma_s n^{-s}, \quad (n > 0), \quad 0 < s < \infty, \quad \gamma_s = \left(\frac{s}{2\alpha e} \right)^s, \quad 0 < \alpha \leq \frac{5}{4M}, \quad (6)$$

(здесь s – степень истокорпредставимости точного решения $x^* = A^s z$, $s > 0$, $\|z\| \leq \rho$);

$$\sup_{0 \leq \lambda \leq M} |1 - \lambda g_n(\lambda)| \leq \gamma_0, \quad \gamma_0 = 1, \quad 0 < \alpha < \frac{2}{M}, \quad n > 0; \quad (7)$$

$$\sup_{0 \leq \lambda \leq M} \lambda |1 - \lambda g_n(\lambda)| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty, \quad 0 < \alpha < \frac{2}{M}. \quad (8)$$

Справедлива



Лемма 1. Пусть $A = A^* \geq 0$, $A_\eta = A_\eta^* \geq 0$, $\|A_\eta - A\| \leq \eta$, $\|A_\eta\| \leq M$, и выполнено условие (6) с $s_0 > 1$. Тогда для $G_{m\eta} = E - A_\eta g_n(A_\eta)$ справедливо соотношение для $\forall v \in \overline{R(A)}$:

$$n\|A_\eta G_{m\eta} v\| \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0. \quad (9)$$

Доказательство

Воспользуемся теоремой Банаха–Штейнгауза [6, с. 151], по которой сходимость $B_n u \rightarrow B u$ при $n \rightarrow \infty$ для $\forall u \in H$ имеет место тогда и только тогда, когда эта сходимость имеет место на некотором плотном в H подмножестве и $\|B_n\|, n=1, 2, \dots$ ограничены не зависящей от n постоянной. Здесь $\|B_n\| = n\|A_\eta G_{m\eta}\|$ и по условию (6) нормы $\|B_n\|$ ограничены в совокупности

$$n\|A_\eta G_{m\eta}\| = n\|A_\eta(E - A_\eta g_n(A_\eta))\| = n \sup_{0 \leq \lambda \leq M} \lambda |1 - \lambda g_n(\lambda)| \leq n\gamma_1 n^{-1} = \gamma_1, (n > 0, \eta > 0).$$

Для элементов вида $v = A\omega$, образующих в $\overline{R(A)}$ плотное подмножество, в силу (6) имеем

$$\begin{aligned} n\|A_\eta G_{m\eta} v\| &= n\|A_\eta G_{m\eta} A\omega\| \leq n\|A_\eta G_{m\eta}(A - A_\eta)\omega\| + \\ &+ n\|A_\eta G_{m\eta} A_\eta\omega\| \leq \left(\gamma_1 \eta + n \sup_{0 \leq \lambda \leq M} \lambda^2 |1 - \lambda g_n(\lambda)| \right) \|\omega\| \leq \\ &\leq (\gamma_1 \eta + n\gamma_2 n^{-2}) \|\omega\| = (\gamma_1 \eta + \gamma_2 n^{-1}) \|\omega\| \rightarrow 0, n \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0. \end{aligned}$$

По теореме Банаха–Штейнгауза $n\|A_\eta G_{m\eta} v\| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0$. Лемма 1 доказана.

Лемма 2. Пусть $A = A^* \geq 0$, $A_\eta = A_\eta^* \geq 0$, $\|A_\eta - A\| \leq \eta$, $\|A_\eta\| \leq M$, и выполнены условия (6) и (8). Если для некоторых $v_0 \in \overline{R(A)}$, $n_p \leq \bar{n} = \text{const}$ и $\eta_p \rightarrow 0$ имеем $A_{\eta_p} G_{n_p \eta_p} v_0 \rightarrow 0$ при $p \rightarrow \infty$, то $G_{n_p \eta_p} v_0 \rightarrow 0$.

Доказательство

В силу неравенства (7) последовательность $v_p = G_{n_p \eta_p} v_0$ ограничена, т. е.

$\|v_p\| = \|G_{n_p \eta_p} v_0\| \leq \gamma_0 \|v_0\|, p \in N = \{1, 2, \dots\}$. Поэтому в гильбертовом пространстве из этой последовательности можно извлечь слабо сходящуюся подпоследовательность $v_p \rightharpoonup v, (p \in N' \subseteq N)$. Тогда $A_{\eta_p} v_p \rightharpoonup A_{\eta_p} v, (p \in N')$. По условию $\omega_p = A_{\eta_p} v_p \rightarrow 0$, значит, $A_{\eta_p} v = 0$. Но так как нуль не является собственным значением оператора A_{η_p} , то $v = 0$. Теперь



$$\|v_p\|^2 = (v_p, G_{n_p \eta_p} v_0) = (v_p, (E - A_{\eta_p} g_{n_p}(A_{\eta_p})) v_0) = (v_p, v_0) - (A_{\eta_p} v_p, g_{n_p}(A_{\eta_p}) v_0) = (v_p, v_0) - (\omega_p, g_{n_p}(A_{\eta_p}) v_0) \rightarrow (v, v_0) = (0, v_0) = 0, \quad (p \in N'),$$

так как $\omega_p \rightarrow 0$, $\|g_{n_p}(A_{\eta_p})\| \leq \gamma n_p \leq \gamma \bar{n}$. Итак, любая слабо сходящаяся подпоследовательность ограниченной последовательности v_p стремится к нулю по норме. Отсюда следует, что и вся последовательность $v_p \rightarrow 0$, $p \rightarrow \infty$ по норме. Лемма 2 доказана.

Используем доказанные леммы при доказательстве следующих теорем.

Теорема 1. Пусть $H = F$, $A = A^* \geq 0$, $A_\eta = A_\eta^* \geq 0$, $\|A_\eta - A\| \leq \eta$, $\|A_\eta\| \leq M$, $(0 < \eta \leq \eta_0)$, $y \in R(A)$, $\|y - y_\delta\| \leq \delta$ и выполнены условия (6), (7) с $s_0 > 1$. Пусть параметр $m(\delta, \eta)$ выбран по правилу (4). Тогда $(\delta + \eta)m(\delta, \eta) \rightarrow 0$, $x_{m(\delta, \eta)} \rightarrow x^*$ при $\delta \rightarrow 0$, $\eta \rightarrow 0$.

Доказательство

Имеем $x_{n(\delta, \eta)} = g_n(A_\eta) y_\delta$, тогда

$$\begin{aligned} x_{n(\delta, \eta)} - x^* &= -x^* + g_n(A_\eta) y_\delta = -G_{m\eta} x^* + G_{m\eta} x^* - \\ &- x^* + g_n(A_\eta) y_\delta = -G_{m\eta} x^* + (E - A_\eta g_n(A_\eta)) x^* - \\ &- x^* + g_n(A_\eta) y_\delta = -G_{m\eta} x^* + x^* - A_\eta g_n(A_\eta) x^* - x^* + \\ &+ g_n(A_\eta) y_\delta = -G_{m\eta} x^* + g_n(A_\eta) (y_\delta - A_\eta x^*). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$x_{n(\delta, \eta)} - x^* = -G_{m\eta} x^* + g_n(A_\eta) (y_\delta - A_\eta x^*). \quad (10)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} A_\eta x_{n(\delta, \eta)} - A_\eta x^* &= -A_\eta G_{m\eta} x^* + A_\eta g_n(A_\eta) y_\delta - A_\eta g_n(A_\eta) A_\eta x^*; \\ A_\eta x_{n(\delta, \eta)} &= A_\eta x^* - A_\eta G_{m\eta} x^* + A_\eta g_n(A_\eta) y_\delta - A_\eta g_n(A_\eta) A_\eta x^*; \\ A_\eta x_{n(\delta, \eta)} - y_\delta &= -A_\eta G_{m\eta} x^* - y_\delta + (E - A_\eta g_n(A_\eta)) A_\eta x^* + A_\eta g_n(A_\eta) y_\delta = \\ &= -A_\eta G_{m\eta} x^* + G_{m\eta} A_\eta x^* - (E - A_\eta g_n(A_\eta)) y_\delta = \\ &= -A_\eta G_{m\eta} x^* + G_{m\eta} A_\eta x^* - G_{m\eta} y_\delta = -A_\eta G_{m\eta} x^* - G_{m\eta} (y_\delta - A_\eta x^*). \end{aligned}$$

Итак,

$$A_\eta x_{n(\delta, \eta)} - y_\delta = -A_\eta G_{m\eta} x^* - G_{m\eta} (y_\delta - A_\eta x^*). \quad (11)$$

Покажем, что $\|G_{m\eta} x^*\| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, $\eta \rightarrow 0$. В силу (7) имеем $\|G_{m\eta}\| = \|E - A_\eta g_n(A_\eta)\| \leq \gamma_0$, $(n > 0, 0 < \eta \leq \eta_0)$. Для элементов вида $u = A\omega$, образующих в $\overline{R(A)}$ плотное подмножество, на основании (8) имеем



$$\begin{aligned} \|G_{m\eta}u\| &= \|G_{m\eta}A\omega\| \leq \|G_{m\eta}(A - A_\eta)\omega\| + \|G_{m\eta}A_\eta\omega\| \leq \\ &\leq \left(\gamma_0\eta + \sup_{0 \leq \lambda \leq M} \lambda|1 - \lambda g_n(\lambda)| \right) \|\omega\| \leq (\gamma_0\eta + \gamma_1 n^{-1}) \|\omega\| \rightarrow 0, \end{aligned}$$

при $n \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0$. Итак,

$$\|G_{m\eta}x^*\| \rightarrow 0, n \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0. \quad (12)$$

Покажем, что

$$\|g_n(A_\eta)(y_\delta - A_\eta x^*)\| \leq \gamma n (\delta + \|x^*\| \eta). \quad (13)$$

По условию (5) $\|g_n(A_\eta)\| \leq \sup_{0 \leq \lambda \leq M} |g_n(\lambda)| \leq \gamma n$, а $\|y_\delta - A_\eta x^*\| \leq \|y_\delta - y\| + \|y - A_\eta x^*\| = \|y_\delta - y\| + \|Ax^* - A_\eta x^*\| \leq \delta + \|(A - A_\eta)x^*\| \leq \delta + \|x^*\| \eta$, поэтому получим $\|g_n(A_\eta)(y_\delta - A_\eta x^*)\| \leq \gamma n (\delta + \|x^*\| \eta)$.

В силу леммы 1

$$\sigma_{m\eta} = n \|A_\eta G_{m\eta} x^*\| \rightarrow 0, n \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0. \quad (14)$$

Применим правило останова (4), тогда $\|A_\eta x_{m(\delta, \eta)} - y_\delta\| \leq b(\delta + \|x^*\| \eta)$, $b > 1$ и из (7) и (11) получим

$$\|A_\eta G_{m\eta} x^*\| \leq (b+1)(\delta + \|x^*\| \eta). \quad (15)$$

Действительно, из (11) $\|A_\eta G_{m\eta} x^*\| \leq \|A_\eta x_{m(\delta, \eta)} - y_\delta\| + \|G_{m\eta}(y_\delta - A_\eta x^*)\| \leq b(\delta + \|x^*\| \eta) + (\delta + \|x^*\| \eta) = (b+1)(\delta + \|x^*\| \eta)$. Для $\forall n < m$ $\|A_\eta x_{n(\delta, \eta)} - y_\delta\| > \varepsilon$, поэтому

$$\|A_\eta G_{m\eta} x^*\| \geq \|A_\eta x_{n(\delta, \eta)} - y_\delta\| - \|G_{m\eta}(y_\delta - A_\eta x^*)\| \geq (b-1)(\delta + \|x^*\| \eta)$$

Следовательно, для $\forall n < m$

$$\|A_\eta G_{m\eta} x^*\| \geq (b-1)(\delta + \|x^*\| \eta). \quad (16)$$

Из (16) и (14) при $n = m-1$ $\frac{\sigma_{m-1, \eta}}{m-1} = \|A_\eta G_{m-1, \eta} x^*\| \geq (b-1)(\delta + \|x^*\| \eta)$ или $(m-1)(\delta + \|x^*\| \eta) \leq \frac{\sigma_{m-1, \eta}}{b-1} \rightarrow 0, \delta \rightarrow 0, \eta \rightarrow 0$ (так как из (14) $\sigma_{m\eta} \rightarrow 0, m \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0$).

Если при этом $m(\delta, \eta) \rightarrow \infty$, при $\delta \rightarrow 0, \eta \rightarrow 0$, то, используя (10), (12) и (13), получим

$$\begin{aligned} \|x_{m(\delta, \eta)} - x^*\| &\leq \|G_{m\eta} x^*\| + \|g_m(A_\eta)(y_\delta - A_\eta x^*)\| \leq \|G_{m\eta} x^*\| + \\ &+ \gamma m(\delta, \eta)(\delta + \|x^*\| \eta) \rightarrow 0, m \rightarrow \infty, \delta \rightarrow 0, \eta \rightarrow 0, \end{aligned}$$

т. е. что $x_{m(\delta, \eta)} \rightarrow x^*$.



Если же для некоторых δ_n и η_n последовательность $m(\delta_n, \eta_n)$ окажется ограниченной, то и в этом случае $x_{m(\delta_n, \eta_n)} \rightarrow x^*$, $\delta_n \rightarrow 0$, $\eta_n \rightarrow 0$. Действительно, из (15) выполняется $\|A_{\eta_n} G_{m\eta_n} x^*\| \leq (b+1)(\delta_n + \|x^*\|\eta_n) \rightarrow 0$, $\delta_n \rightarrow 0$, $\eta_n \rightarrow 0$. Следовательно, имеем $A_{\eta_n} G_{m\eta_n} x^* \rightarrow 0$, $\delta_n \rightarrow 0$, $\eta_n \rightarrow 0$ и по лемме 2 получаем, что при $\delta_n \rightarrow 0$, $\eta_n \rightarrow 0$ выполняется $G_{m\eta_n} x^* \rightarrow 0$. Отсюда

$$\|x_{m(\delta_n, \eta_n)} - x^*\| \leq \|G_{m\eta_n} x^*\| + \gamma m(\delta_n, \eta_n) (\delta_n + \|x^*\|\eta_n) \rightarrow 0, \quad \delta_n \rightarrow 0, \eta_n \rightarrow 0.$$

Теорема 1 доказана.

Теорема 2. Пусть выполнены условия теоремы 1. Если $x^* = A^s z$, $s > 0$, $\|z\| \leq \rho$,

то справедливы оценки $m \leq 1 + \frac{s+1}{2\alpha e} \frac{\rho^{1/(s+1)}}{[(b-1)(\delta + \|x^*\|\eta) - c_s \gamma_1 \eta \rho]^{1/(s+1)}}$;

$$\begin{aligned} \|x_{m(\delta, \eta)} - x^*\| &\leq c_s \eta^{\min(1, s)} \rho + [c_s \gamma_1 \eta \rho + (b+1)(\delta + \|x^*\|\eta)]^{s/(s+1)} \rho^{1/(s+1)} + \\ &+ 2\alpha \left\{ 1 + \frac{s+1}{2\alpha e} \frac{\rho^{1/(s+1)}}{[(b-1)(\delta + \|x^*\|\eta) - c_s \gamma_1 \eta \rho]^{1/(s+1)}} \right\} (\delta + \|x^*\|\eta). \end{aligned} \quad (17)$$

Доказательство

Оценим заново элемент $\|A_{\eta} G_{m-1, \eta} x^*\|$. В силу (6) и леммы 1.1 [3, с. 91]

$$\begin{aligned} \|A_{\eta} G_{m-1, \eta} x^*\| &= \|A_{\eta} G_{m-1, \eta} A^s z\| \leq \|A_{\eta} G_{m-1, \eta} (A^s - A_{\eta}^s) z\| + \\ &+ \|A_{\eta}^{s+1} G_{m-1, \eta} z\| \leq (\beta_{m-1, s} \eta + \gamma_{s+1} (m-1)^{-(s+1)}) \rho, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \beta_{m-1, s} &= c_s \sup_{0 \leq \lambda \leq M} \lambda(1 - \lambda g_{m-1}(\lambda)) \leq [2(m-1)\alpha e]^{-1} c_s = \\ &= c_s \gamma_1 (m-1)^{-1}, \quad \beta_{m-1, s} \rightarrow 0, \quad m \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Здесь $c_s = \text{const}$ (при $0 < s \leq 1$ $c_s \leq 2$). Сопоставляя это с (16), получим $(b-1)(\delta + \|x^*\|\eta) \leq (\beta_{m-1, s} \eta + \gamma_{s+1} (m-1)^{-(s+1)}) \rho$. Отсюда получим $\gamma_{s+1} (m-1)^{-(s+1)} \rho \geq$

$$\geq (b-1)(\delta + \|x^*\|\eta) - \beta_{m-1, s} \eta \rho, \quad \text{тогда} \quad m \leq 1 + \frac{s+1}{2\alpha e} \left[\frac{\rho}{(b-1)(\delta + \|x^*\|\eta) - \beta_{m-1, s} \eta \rho} \right]^{1/(s+1)}.$$



Поскольку $\beta_{m-1,s} = c_s \gamma_1 \frac{1}{m-1} \leq c_s \gamma_1$ (так как при $m > 1$ $\frac{1}{m-1} \leq 1$), то $(b-1)(\delta + \|x^*\| \eta) - \beta_{m-1,s} \eta \rho \geq (b-1)(\delta + \|x^*\| \eta) - c_s \gamma_1 \eta \rho$, и, значит, получим следующую оценку для m : $m \leq 1 + \frac{s+1}{2\alpha e} \frac{\rho^{1/(s+1)}}{[(b-1)(\delta + \|x^*\| \eta) - c_s \gamma_1 \eta \rho]^{1/(s+1)}}$.

Из (10) и (13) имеем $\|G_{m\eta} x^*\| = \|G_{m\eta} A^s z\| \leq \|G_{m\eta} (A^s - A_\eta^s) z\| + \|G_{m\eta} A_\eta^s z\|$. По лемме 1.1 [3, с. 91] $\|G_{m\eta} (A^s - A_\eta^s) z\| \leq c_s \eta^{\min(1,s)} \rho$, что даёт в оценку $\|x_{m(\delta,\eta)} - x^*\|$ вклад $O((\delta + \eta)^{s/(s+1)})$ [3, с. 111]. Норму $\|G_{m\eta} A_\eta^s z\|$ оценим с помощью неравенства моментов, леммы 1.1 [3, с. 91] и (15):

$$\begin{aligned} \|G_{m\eta} A_\eta^s z\| &= \|A_\eta^s G_{m\eta} z\| = \|A_\eta^{s+1} G_{m\eta} z\|^{s/(s+1)} \|G_{m\eta} z\|^{1/(s+1)} \leq \\ &\leq \|A_\eta G_{m\eta} A_\eta^s z\|^{s/(s+1)} \|z\|^{1/(s+1)} \leq \|A_\eta G_{m\eta} (A_\eta^s - A^s) z\| + \\ &+ \|A_\eta G_{m\eta} A^s z\|^{s/(s+1)} \rho^{1/(s+1)} \leq [\beta_{ms} \eta \rho + (b+1)(\delta + \|x^*\| \eta)]^{s/(s+1)} \rho^{1/(s+1)}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \|x_{m(\delta,\eta)} - x^*\| &\leq \|G_{m\eta} x^*\| + \|g_m(A_\eta)(y_\delta - A_\eta x^*)\| \leq c_s \eta^{\min(1,s)} \rho + [\beta_{ms} \eta \rho + (b+1) \times \\ &\times (\delta + \|x^*\| \eta)]^{s/(s+1)} \rho^{1/(s+1)} + \gamma m (\delta + \|x^*\| \eta) \leq c_s \eta^{\min(1,s)} \rho + [c_s \gamma_1 \eta \rho + (b+1)(\delta + \|x^*\| \eta)]^{s/(s+1)} \rho^{1/(s+1)} + \\ &+ 2\alpha \left\{ 1 + \frac{s+1}{2\alpha e} \frac{\rho^{1/(s+1)}}{[(b-1)(\delta + \|x^*\| \eta) - c_s \gamma_1 \eta \rho]^{1/(s+1)}} \right\} (\delta + \|x^*\| \eta). \end{aligned}$$

Теорема 2 доказана.

Замечание 1. Порядок оценки (17) есть $O((\delta + \eta)^{s/(s+1)})$ и, как следует из [3], он оптимален в классе задач с истокорпредставимыми решениями.

Замечание 2. Хотя формулировка теоремы 2 даётся с указанием степени истокорпредставимости s и истокорпредставляющего элемента z , на практике их значения не потребуются, так как они не содержатся в правиле останова (4).

4. Случай несамосопряжённой задачи

В случае несамосопряжённой задачи итерационный метод (3) примет вид

$$x_{(n+1)(\eta,\delta)} = (E - \alpha A_\eta^* A_\eta)^2 x_{n(\eta,\delta)} + 2\alpha A_\eta^* y_\delta - \alpha^2 (A_\eta^* A_\eta) A_\eta^* y_\delta, \quad x_{0(\eta,\delta)} = 0. \quad (18)$$

Нетрудно показать, что метод (18) с правилом останова (4) сходится и можно получить оценку для момента останова и оценку погрешности метода (18).
Справедливы



Лемма 3. Пусть $A, A_\eta \in \mathcal{L}(H, F)$, $\|A_\eta - A\| \leq \eta$, $\|A_\eta\|^2 \leq M$ и выполнено условие (6) с $s_0 > 1/2$. Тогда $n^{1/2} \|A_\eta K_{n\eta} v\| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0, \forall v \in \overline{R(A^*)}$, где $K_{n\eta} = E - A_\eta^* A_\eta g_n(A_\eta^* A_\eta)$. Если $s_0 > 1$, то $n \|A_\eta^* A_\eta K_{n\eta} v\| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0, \forall v \in \overline{R(A^*)}$.

Лемма 4. Пусть $A, A_\eta \in \mathcal{L}(H, F)$, $\|A_\eta - A\| \leq \eta$, $\|A_\eta\|^2 \leq M$ и выполнены условия (6), (8). Если для некоторого $v_0 \in R(A^*)$, $n_p \leq \bar{n} = \text{const}$ и $\eta_p \rightarrow 0$ имеем $A_{\eta_p} K_{n_p \eta_p} v_0 \rightarrow 0$ или $A_{\eta_p}^* A_{\eta_p} K_{n_p \eta_p} v_0 \rightarrow 0$ при $p \rightarrow \infty$, то $K_{n_p \eta_p} v_0 \rightarrow 0$.

Теорема 3. Пусть $A, A_\eta \in \mathcal{L}(H, F)$, $\|A_\eta - A\| \leq \eta$, $\|A_\eta\|^2 \leq M$, $(0 < \eta \leq \eta_0)$, $y \in R(A)$, $\|y - y_\delta\| \leq \delta$ и выполнены условия (6), (7) с $s_0 > 1/2$, $\gamma_0 = 1$. Пусть параметр $m(\delta, \eta)$ выбран по правилу (4). Тогда $(\delta + \eta)^2 m(\delta, \eta) \rightarrow 0$, $x_{m(\delta, \eta)} \rightarrow x^*$ при $\delta \rightarrow 0, \eta \rightarrow 0$.

Теорема 4. Пусть выполнены условия теоремы 3. Если $x^* = |A|^s z$, $s > 0$, $\|z\| \leq \rho$, $|A| = (A^* A)^{1/2}$, то справедливы оценки $m \leq 1 + \frac{s+1}{4\alpha e} \left[\frac{\rho}{(b-1)(\delta + \|x^*\|\eta) - c_s \gamma_{1/2} \eta \rho} \right]^{2/(s+1)}$;
 $\|x_{m(\delta, \eta)} - x^*\| \leq c_s (1 + |\ln \eta|) \eta^{\min(1, s)} + [c_s \gamma_{1/2} \eta \rho + (b+1)(\delta + \|x^*\|\eta)]^{s/(s+1)} \rho^{1/(s+1)} +$
 $+ \left(\frac{35}{27} \alpha \right)^{1/2} \left\{ 1 + \frac{s+1}{4\alpha e} \left[\frac{\rho}{(b-1)(\delta + \|x^*\|\eta) - c_s \gamma_{1/2} \eta \rho} \right]^{2/(s+1)} \right\}^{1/2} (\delta + \|x^*\|\eta). \quad (19)$

Доказательство лемм 3–4, теорем 3–4 аналогично доказательству подобных лемм и теорем из раздела 3.

Замечание 3. Порядок оценки (19) есть $O((\delta + \eta)^{s/(s+1)})$, и, как следует из [3], он оптимален в классе задач с истокопредставимыми решениями.

Замечание 4. Знание порядка $s > 0$ и истокопредставляющего элемента z , используемое в теореме 4, на практике не потребуется. При останове по невязке автоматически делается нужное число итераций для получения оптимального по порядку решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савчук, В.Ф. Регуляризация операторных уравнений в гильбертовом пространстве / В.Ф. Савчук, О.В. Матысик. – Брест : Изд-во БрГУ, 2008. – 195 с.



2. Матысик, О.В. О регуляризации некорректных задач с приближенным оператором явным методом итераций / О.В. Матысик, В.Ф. Савчук // Вучоныя запіскі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна – 2012. – Вып. 8. – Ч. 2. – С. 7–13.
3. Вайникко, Г.М. Итерационные процедуры в некорректных задачах / Г.М. Вайникко, А.Ю. Веретенников. – М. : Наука, 1986. – 178 с.
4. Лаврентьев, М.М. О некоторых некорректных задачах математической физики / М.М. Лаврентьев. – Новосибирск : Изд-во СО АН СССР, 1962. – 92 с.
5. Самарский, А.А. Численные методы решения обратных задач математической физики / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 480 с.
6. Люстерник, Л.А. Элементы функционального анализа / Л.А. Люстерник, В.И. Соболев. – М. : Наука, 1965. – 520 с.

O.V. Matysik, V.F. Savchuk On Aposteriori Choice of Regularization Parameter in Explicit Method of Iterations Incorrect Problems with Approximately Operator

The explicit iteration method for solution of the first-kind operator equations with a self-conjugated and non self-conjugated non negative bounded operator in the Hilbert space is proposed. Convergence of a method is proved in case of an aposteriori choice of number of iterations in usual norm of Hilbert space, supposing that not only the right part of the equation but the operator as well have errors. The estimation of an error method and estimation for aposteriori moment of stop are received.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 27.09.2013



УДК 512.542

А.А. Трофимук, С.Н. Ткач

О ВЛИЯНИИ ФИТТИНГОВЫХ ФАКТОРОВ НА СТРОЕНИЕ ГРУППЫ

В данной статье приводится обзор результатов, связанных с инвариантами (производной длиной, нильпотентной длиной, p -длиной, главным рангом) разрешимой группы с заданным строением силовских подгрупп фиттинговых факторов и примыкающих к исследованиям авторов. Сформулированы открытые вопросы.

Введение

Все рассматриваемые группы предполагаются конечными.

Важным направлением теории конечных групп является изучение строения групп, у которых определенная система подгрупп обладает заданными свойствами. В приведенных ниже работах в качестве определяющей системы подгрупп авторы выбирали силовские подгруппы или из самой подгруппы Фиттинга, или силовские подгруппы фиттинговых факторов, а в качестве определяющего свойства – цикличность, абелевость, бицикличность или ограничение на порядок.

Главный фактор H/K называется *фиттинговым*, если подгруппа H содержится в подгруппе Фиттинга $F(G)$ группы G .

Хупперт показал, что разрешимая группа тогда и только тогда является сверхразрешимой, когда фиттинговы главные факторы имеют простые порядки. В частности, если порядок подгруппы Фиттинга разрешимой группы свободен от квадратов, то группа является сверхразрешимой. Я.Г. Беркович [1] продолжил исследования в данном направлении и установил, что разрешимая группа имеет главный ранг, не превосходящий 2, тогда и только тогда, когда порядки ее фиттинговых главных факторов свободны от кубов.

Из теоремы Цассенхауза следует, что группа, обладающая нормальным рядом с циклическими силовскими подгруппами в факторах, является сверхразрешимой. Бэр установил [2, с. 720], что если на участке нормального ряда разрешимой группы между подгруппой Фраттини и подгруппой Фиттинга факторы имеют простые порядки, то группа сверхразрешима.

Особый интерес представляет развитие вышеуказанных результатов Хупперта, Цассенхауза, Бэра, Я.Г. Берковича, поскольку их работы являются основой для изучения строения классов групп с заданными ограничениями на силовские подгруппы фиттинговых факторов.

Статья носит обзорный характер. Доказательства утверждений не приводятся.

1. Обозначения и определения

Все обозначения и определения соответствуют принятым в [2–4].

Подгруппы Фраттини и Фиттинга группы G обозначаются через $\Phi(G)$ и $F(G)$, а запись $G = [A]B$ означает полупрямое произведение с нормальной подгруппой A .

Нормальным рядом группы G называется цепочка подгрупп

$$1 = G_0 \subseteq G_1 \subseteq \dots \subseteq G_m = G, \quad (1)$$



в которой подгруппа G_i нормальна в группе G для всех $i = 0, 1, \dots, m$. Фактор-группы G_{i+1}/G_i называются *факторами* этого ряда (1).

Дисперсивной по Оре называют группу G порядка

$$p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_n^{\alpha_n}, p_1 < p_2 < \dots < p_n,$$

у которой имеется нормальный ряд

$$G = G_0 \supseteq G_1 \supseteq \dots \supseteq G_{n-1} \supseteq G_n = 1$$

такой, что для каждого $i = 1, 2, \dots, n$ фактор-группа G_{i-1}/G_i изоморфна силовой p_i -подгруппе группы G .

Для группы G можно построить цепочку коммутантов

$$G \supseteq G' \supseteq (G')' \supseteq \dots \supseteq G^{(i)} \supseteq G^{(i+1)} \supseteq \dots$$

Здесь G' – коммутант группы G и $G^{(i+1)} = (G^{(i)})'$. Если существует номер n такой, что $G^{(n)} = 1$, то группа G называется *разрешимой*. Наименьшее натуральное n , для которого $G^{(n)} = 1$, называется *производной длиной* и обозначается через $d(G)$.

Пусть G – группа и пусть $F_0(G) = 1$,

$F_1(G) = F(G)$ – подгруппа Фиттинга группы G ,

$F_2(G)/F_1(G) = F(G/F_1(G)), \dots, F_i(G)/F_{i-1}(G) = F(G/F_{i-1}(G)), \dots$

Ясно, что $1 = F_0(G) \subseteq F_1(G) \subseteq F_2(G) \subseteq \dots$

В разрешимой неединичной группе подгруппа Фиттинга отлична от единичной подгруппы. Поэтому для разрешимой группы существует неотрицательное целое число n такое, что $F_n(G) = G$. Наименьшее n , для которого $F_n(G) = G$, называют *нильпотентной длиной* разрешимой группы G и обозначают через $n(G)$. Другими словами, nilпотентной длиной называют длину самого короткого нормального ряда с nilпотентными факторами. Ясно, что $n(G) = 1$ тогда и только тогда, когда группа G nilпотентна. Группа называется *метанильпотентной*, если она содержит nilпотентную нормальную подгруппу, фактор-группа по которой nilпотентна. Ясно, что nilпотентная длина метанильпотентной группы не превышает 2.

Пусть G – p -разрешимая группа. Это означает, что она обладает нормальным рядом

$$1 = G_0 \subseteq G_1 \subseteq \dots \subseteq G_n = G,$$

в котором каждая фактор-группа G_{i+1}/G_i является либо p -группой, либо p' -группой. Поэтому для такой группы можно определить (p', p) -ряд:

$$1 = P_0 \subseteq N_0 \subseteq P_1 \subseteq N_1 \subseteq P_2 \subseteq \dots \subseteq P_l \subseteq N_l = G,$$

где $N_i/P_i = O_{p'}(G/P_i)$ – наибольшая нормальная p' -подгруппа в G/P_i , а $P_{i+1}/N_i = O_p(G/N_i)$ – наибольшая нормальная p -подгруппа в G/N_i . Наименьшее натуральное число l такое, что $N_l = G$, называют *p -длиной* группы G и обозначают через $l_p(G)$.

Если G – неединичная p -разрешимая группа и p^n – наибольшая из степеней простого числа p , делящая порядок главных факторов группы G , то число $n = r_p(G)$ называется *p -рангом* группы G [2, с. 685]. Если G – разрешима, то она p -разрешима



для всех $p \in \pi(G)$. Главный ранг разрешимой неединичной группы определим следующим образом:

$$r(G) = \max_{p \in \pi(G)} r_p(G).$$

Для единичной группы 1 полагают $r(1) = 0 = r_p(1)$. В силу теоремы Жордана–Гельдера любые два главных ряда группы G изоморфны, поэтому значения главного ранга и p -ранга определяются однозначно.

Группу G будем называть p -сверхразрешимой, если каждый из ее главных факторов является либо группой простого порядка, либо p' -группой. Ясно, что неединичная p -сверхразрешимая группа p -разрешима и имеет p -ранг 1. Если группа G p -сверхразрешима для любого $p \in \pi(G)$, то она называется *сверхразрешимой*. Главный ранг неединичной сверхразрешимой группы равен 1.

2. Основные результаты

Согласно теореме Цассенхауза [2, теорема IV.2.11] коммутант группы с циклическими силовскими подгруппами является циклической холловой подгруппой, фактор-группа по которой также циклическая. В частности, ее производная длина не выше 2.

Бициклической называют группу $G = AB$, являющуюся произведением циклических подгрупп A и B .

Инварианты разрешимых групп с бициклическими силовскими подгруппами получены в работе В.С. Монахова и Е.Е. Грибовской [5]. В частности, производная длина таких групп не превышает 6.

Ф. Холл и Г. Хигмен [2, теорема IV.14.16] установили, что производная длина разрешимой группы G с абелевыми силовскими подгруппами не превышает числа простых делителей порядка группы: $d(G) \leq |\pi(G)|$.

В [6] В.С. Монаховым получена оценка производной длины фактор-группы $G/\Phi(G)$ в зависимости от порядков силовских подгрупп группы G . В частности, если порядок разрешимой группы не делится на $(n + 1)$ -е степени простых чисел, то производная длина фактор-группы $G/\Phi(G)$ не превышает $3+n$. Здесь $\Phi(G)$ – подгруппа Фраттини группы G .

А.А. Трофимук [7] заметил, что для оценки производной длины разрешимой группы достаточно рассматривать порядки силовских подгрупп только ее подгруппы Фиттинга. Кроме того, существенное влияние на верхнюю границу производной длины группы оказывают порядки не всех силовских подгрупп из подгруппы Фиттинга, а только тех, которые не являются бициклическими, если таковые имеются.

Теорема 1. (А.А. Трофимук [7]) Пусть G – разрешимая непримарная группа и F – ее подгруппа Фиттинга. Тогда справедливы следующие утверждения:

1. Если $\pi^*(F) \neq \emptyset$, то $d(G) \leq \rho(t(F)) + \max\{d(F_p) \mid p \in \pi(F)\}$.
2. Если $\pi^*(F) = \emptyset$, то $d(G) \leq 6$.

Здесь $\pi^*(F)$ – множество всех простых чисел p из $\pi(F)$, для которых силовская p -подгруппа в F не является бициклической. Если $\pi^*(F) = \emptyset$, то в группе F все силовские подгруппы бициклические. Функции $t_p(F)$ и $t(F)$ определяются следующим образом:



$$t_p(F) = \log_p(|F_p|), t(F) = \max_{p \in \pi^*(F)} t_p(F).$$

Через $\rho(n)$ обозначается максимум производных длин вполне приводимых разрешимых подгрупп группы $GL(n, F)$ степени n , где F – поле.

Следствие. [7] Пусть G – разрешимая непримарная группа и F – ее подгруппа Фиттинга. Тогда справедливы следующие утверждения:

1. Если силовские подгруппы в F бициклические, то производная длина не превышает 6.

2. Если $\pi^*(F) \neq \emptyset$, то $d(G) \leq \rho(t(F)) + \delta(t(F)) + 1$.

Здесь $\delta(n) = \max\{d \in \mathbb{N} \mid n \geq 2^d + 2d - 2\}$.

В 1978 году Гашюц [8] установил справедливость следующего утверждения: если H/K – главный фактор наибольшего порядка разрешимой группы G , то подгруппа H содержится в $F(G)$. Отсюда не следует, что каждый главный фактор порядка $p^{r(G)}$, p – простое число, является фиттинговым. Примером служит любая сверхразрешимая ненильпотентная группа.

Поэтому вполне естественно возникает вопрос о существовании в разрешимых группах фиттинговых главных факторов порядка $p^{r(G)}$, p – простое число. Ответ на этот вопрос получил В.С. Монахов [9], теорема 2: в каждой разрешимой неединичной группе G существует нильпотентная нормальная подгруппа K такая, что $\Phi(G) \leq K$, $K/\Phi(G)$ – главный фактор группы G и $|K/\Phi(G)| = p^{r(G/\Phi(G))}$ для некоторого простого числа p .

В работе [10] установлена зависимость ранга и производной длины конечной разрешимой группы от величины индекса фиттинговых подгрупп в своих нормальных замыканиях.

Теорема 2. (А.А. Трофимук [10], теорема 1) Пусть G – разрешимая группа. Тогда справедливы следующие утверждения:

1. $r(G/\Phi(G)) \leq 1 + t^F(G)$.

2. $d(G/\Phi(G)) \leq 1 + \rho(1 + t^F(G)) \leq 4 + t^F(G)$.

Теорема 3. (А.А. Трофимук [10], теорема 2) Пусть G – разрешимая группа и $t^F(G) \leq 2$. Тогда $d(G/\Phi(G)) \leq 6$, $n(G) \leq 4$ и $l_p(G) \leq 2$ для любого простого p . В частности, если группа A_4 -свободна, то $d(G/\Phi(G)) \leq 5$.

Здесь функции $t_p^F(G)$ и $t^F(G)$ определяются следующим образом:

$$t_p^F(G) = \max\{n \mid p^n \parallel |H^G|, H \leq F(G)\}, p \in \pi(G);$$

$$t^F(G) = \max_{p \in \pi(G)} t_p^F(G).$$

Здесь запись $p^k \parallel n$ означает, что p^k делит n , но p^{k+1} не делит n ; H^G – наименьшая нормальная подгруппа группы G , содержащая H .

Построены примеры, показывающие точность полученных оценок в теореме 3.

Пример 1. Пусть E_{7^3} – элементарная абелева группа порядка 7^3 , а K – экстраспециальная группа порядка 27. С помощью компьютерной системы GAP



построена группа $G = [E_{7^3}][[K]SL(2,3)]$ порядка 222 264. Подгруппа Фиттинга данной группы совпадает с подгруппой E_{7^3} и $t^F(G) = 2$. Подгруппа Фраттини $\Phi(G) = 1$, производная длина группы G равна 6, а нильпотентная длина группы G равна 4.

Пример 2. Пусть E_{7^3} – элементарная абелева группа порядка 7^3 , S – экстраспециальная группа порядка 27, Q_8 – группа кватернионов порядка 8. С помощью системы компьютерной алгебры GAP построена группа $G = [E_{7^3}][[S]Q_8)$ порядка $74\,088 = 2^3 \cdot 3^3 \cdot 7^3$, которая является A_4 -свободной группой. Ее подгруппа Фраттини $\Phi(G) = 1$ и производная длина равна 5. Кроме того, $F(G) = E_{7^3}$ и $t^F(G) = 2$.

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.С. Монаховым, А.А. Трофимуком [11]. В частности, доказано, что *нильпотентная длина таких групп не превышает 4, а производная длина фактор-группы $G/\Phi(G)$ не превышает 5, $l_2(G) \leq 2$, $l_3(G) \leq 2$ и $l_p(G) \leq 1$ для всех простых $p > 3$.*

В работе А.А. Трофимука [12] продолжено изучение разрешимых групп, обладающих нормальными рядами, факторы которых имеют ограничения на силовские подгруппы. Основным результатом работы является факт сохранения оценок некоторых инвариантов, полученных в работе [11], для разрешимых групп, обладающих нормальными рядами такими, что силовские p -подгруппы их факторов являются либо бициклическими, либо порядка p^3 для каждого $p \in \pi(G)$. В частности, *нильпотентная длина таких групп не превышает 4, $l_2(G) \leq 2$, $l_3(G) \leq 2$ и $l_p(G) \leq 1$ для всех простых $p > 3$. Однако, оценка производная длина фактор-группы $G/\Phi(G)$ увеличивается, а именно, не превышает 6.*

Разрешимые группы из работы [11] и группы, исследуемые в работе [12], имеют одинаковые верхние границы нильпотентной длины и p -длины, а для производной длины верхние границы различны. Однако, оказалось, что если порядки небициклических силовских подгрупп в факторах ограничить кубами малых простых чисел $p \in \{2,3,5,11,17\}$, либо 16, либо 32, то можно сохранить верхнюю оценку производной длины $G/\Phi(G)$ равную 5.

Пример 3. Пусть E_{13^3} – элементарная абелева группа порядка 13^3 , а K – экстраспециальная группа порядка 27. С помощью компьютерной системы GAP построена группа $G = [E_{13^3}][[K]SL(2,3)]$ порядка 1 423 656. Очевидно, что группа G



обладает нормальным рядом, факторы которого являются либо бициклическими, либо имеют порядок 13^3 и 3^3 . Подгруппа Фраттини $\Phi(G) = 1$, производная длина группы G равна 6, а нильпотентная длина группы G равна 4. Таким образом, полученные оценки производной и нильпотентной длины в работе [12] являются точными.

На основании результатов, полученных в работах [7], [11], [12] возникают вполне естественные задачи:

- получить оценки инвариантов (производной длины, нильпотентной длины, r -длины) разрешимых групп, обладающих нормальным рядом с бициклическими силовскими подгруппами в подгруппах Фиттинга его факторов групп;
- установить новые свойства группы в случае ее A_4 -свободности;
- получить зависимость производной длины группы от порядков небциклических силовских подгрупп в подгруппах Фиттинга факторов ее нормальных рядов;
- уточнить получаемые оценки и получить ряд новых свойств таких групп в случае небольших порядков небциклических силовских подгрупп.

Хорошо известен результат Бэра [2, с. 720]: если в разрешимой группе G существует цепочка подгрупп

$$\Phi(G) = G_0 \subset G_1 \subset \dots \subset G_{m-1} \subset G_m = F(G), \quad (2)$$

такая, что G_i нормальна в G и $|G_{i+1}/G_i|$ является простым числом для всех i , то G сверхразрешима.

Легко проверить, что группа останется сверхразрешимой, если силовские подгруппы в факторах цепочки вида (2) будут циклическими.

Поэтому вполне естественно исследовать разрешимые группы, у которых силовские подгруппы в факторах цепочки вида (2) являются бициклическими.

Теорема 4 (А.А. Трофимук [13]). Пусть G – разрешимая группа. Предположим, что в G существует цепочка подгрупп вида (2) такая, что G_i нормальны в G и силовские подгруппы в факторах G_{i+1}/G_i являются бициклическими для всех i . Тогда справедливы следующие утверждения:

1. Нильпотентная длина группы G не превышает 4, а производная длина фактор-группы $G/\Phi(G)$ не превышает 5.

2. $l_p(G) \leq 2$ для всех простых p .

3. Если группа G A_4 -свободна, то производная длина фактор-группы $G/\Phi(G)$ не превышает 3.

Исследования, проведенные в работе [12], приводят к следующему вопросу: изменятся ли оценки верхних границ нильпотентной длины, производной длины и r -длины разрешимых групп из теоремы 4, если силовские подгруппы в факторах G_{i+1}/G_i ряда (2) будут либо бициклическими, либо порядка p^3 для каждого $p \in \pi(G)$?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович, Я.Г. О разрешимых группах конечного порядка / Я.Г. Беркович // Мат. сб. – 1967. – Т. 74(116), № 1. – С. 75–92.
2. Huppert, B. Endliche Gruppen I / B. Huppert. – Berlin-Heidelberg-New York: Springer, 1967.



3. Шеметков, Л.А. Формации конечных групп / Л.А. Шеметков. – М. : Наука, 1978. – 272 с.
4. Монахов, В.С. Введение в теорию конечных групп и их классов / В.С. Монахов. – Минск : Вышэйшая школа, 2006. – 207 с.
5. Монахов, В.С. О максимальных и силовских подгруппах конечных разрешимых групп / В.С. Монахов, Е.Е. Грибовская // Математические заметки. – 2001. – Т. 70. – № 4. – С. 603–612.
6. Монахов, В.С. Об индексах максимальных подгрупп конечных разрешимых групп / В.С. Монахов // Алгебра и логика. – 2004. – Т. 43. – № 4. – С. 411–424.
7. Трофимук, А.А. Производная длина конечных групп с ограничениями на силовские подгруппы / А.А. Трофимук // Математические заметки. – 2010. – Т. 87. – № 2. – С. 287–293.
8. Gashutz, W. Existenz und Konjugiertsein von Untergruppen, die in endlichen auflösbaren Gruppen durch gewisse Indexschränken definiert sind / W. Gashutz // J. Algebra. – 1978. – V. 53. – № 2. – S. 389–394.
9. Монахов, В.С. К теореме Хупперта-Шеметкова / В.С. Монахов // Труды института математики. – 2008. – Т. 16. – № 1. – С. 64–66.
10. Трофимук, А.А. О фиттинговых подгруппах конечной разрешимой группы / А.А. Трофимук // Труды института математики и механики УрО РАН. – 2012. – №3 (18). – С. 242–246.
11. 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. – № 39. – P. 3178–3186.
12. Трофимук, А.А. О конечных группах с небольшими порядками небициклических силовских подгрупп факторов // А.А. Трофимук // Вестник Брестского университета. Серия 4. Физика. Математика. – 2012. – № 1. – С. 107–115.
13. Трофимук, А.А. Конечные группы с бициклическими силовскими подгруппами в фиттинговых факторах // А.А. Трофимук // Труды Института математики и механики УрО РАН. – 2013. – № 3 (19). – С. 304–307.

A.A. Trofimuk, S.N. Tkach On Influence of the Fitting Factors on Structure of the Group

The review of the results connected with invariants (the derived length, the nilpotent length, the p-length, the chief rank) of solvable groups with given structure of Sylow subgroups of the fitting factors is given in this article. These results adjoin to the researches of authors. Open questions are formulated.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 04.09.2013



УДК 539.12:530.145

В.А. Плетюхов, П.П. Андрусевич

ВНУТРЕННЯЯ СИММЕТРИЯ ДИРАКОВСКИХ И ДИРАК– КЭЛЕРОВСКИХ ПОЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ 2+1

В настоящей работе исследованы свойства внутренней симметрии одного и системы двух уравнений Дирака, уравнения Дирака–Кэлера в пространстве размерности 2+1. Используется метод, основанный на приведении соответствующих уравнений к вещественной форме. Показано, что группы симметрии, которые при этом обнаруживаются, существенно шире симметрий, обычно сопоставляемых данным полям.

Введение

В большинстве публикаций, посвященных графену, существенное внимание уделяется изучению внутренних симметрий как безмассового, так и массивного уравнений Дирака в пространстве размерности 2+1, а также симметрий системы двух уравнений Дирака в указанном пространстве. Однако полученные результаты (см., напр., [1; 2]) не коррелируют с хорошо известными результатами оценки параметров внутренней симметрии для уравнения Дирака в пространстве размерности 3+1.

В настоящей работе применяется метод исследования дираковских полей, разработанный в [5; 6], который базируется на использовании вещественной формы диракоподобных релятивистских волновых уравнений. На его основе можно установить наличие групп внутренней симметрии лагранжианов безмассового и массивного 4n-компонентных дираковских полей в пространстве 2+1, более широких по числу элементов симметрии, чем те, которые обсуждаются в вышеуказанных и других публикациях по данному вопросу и полностью согласуются с выводами о числе параметров симметрии дираковских полей в пространстве размерности 3+1.

Кроме того, известно, что в пространстве размерности 3+1 частицы со спином 1/2 и дополнительными степенями свободы можно описывать посредством полного набора антисимметричных тензорных полей, подчиняющихся уравнению Дирака–Кэлера (см. [7] и цитированную здесь литературу). Такое описание оказывается возможным благодаря совпадению свойств внутренней симметрии уравнения Дирака–Кэлера и системы четырех уравнений Дирака с лагранжианом $L = L_1 + L_2 - L_3 - L_4$. С учетом вышесказанного представляет интерес исследование уравнения Дирака–Кэлера в пространстве 2+1 на предмет возможности этого уравнения служить в качестве модели геометризованного описания квазичастиц в графене посредством тензорных полей. Для этого необходимо провести сравнительный анализ внутренней симметрии уравнения Дирака–Кэлера и системы двух уравнений Дирака в пространстве 2+1.

Рассмотрению вышеуказанных вопросов посвящена настоящая работа.

1. Вещественная форма и внутренняя симметрия уравнения Дирака

Продемонстрируем суть используемого метода на примере безмассового уравнения Дирака в трехмерном пространстве-времени, которое можно получить из обычного уравнения Дирака, исключив из него одно пространственное измерение, например, x_3 . В результате получим уравнение

$$(\gamma_k \partial_k + m)\psi = 0, \quad (k = 0, 1, 2). \quad (1.1)$$



Для безмассового случая ($m = 0$) имеем

$$\gamma_k \partial_k \psi = 0, \quad (k = 0, 1, 2). \quad (1.2)$$

Будем использовать метрику, соответствующую выбору $x_0 = ict$. Выберем матрицы γ_k в виде

$$\gamma_0 = \sigma_3 \otimes I_2, \quad \gamma_1 = \sigma_2 \otimes \sigma_1, \quad \gamma_2 = \sigma_2 \otimes \sigma_2, \quad (1.3)$$

где σ_i – матрицы Паули. Возьмем от (1.2) комплексное сопряжение и, учитывая мнимый характер временной координаты x_0 , для сопряженной функции ψ^* получим

$$(-\gamma_0 \partial_0 - \gamma_1 \partial_1 + \gamma_2 \partial_2) \psi^* = 0. \quad (1.4)$$

Рассматривая совместно уравнения (1.2) и (1.4), приходим к 8-компонентной системе уравнений. Её также можно записать в стандартной матричной форме

$$\Gamma_k \partial_k \Psi = 0, \quad (1.5)$$

где

$$\Psi = (\psi, \psi^*) \text{ – столбец} \quad (1.6)$$

и матрицы Γ_k имеют вид

$$\Gamma_0 = \sigma_3 \otimes \gamma_0, \quad \Gamma_1 = \sigma_3 \otimes \gamma_1, \quad \Gamma_2 = I_2 \otimes \gamma_2. \quad (1.7)$$

Для дальнейшего удобства перейдем к представлению, в котором вещественные и мнимые компоненты волновой функции разделены:

$$\Psi = (\psi^r, \psi^i) \text{ – столбец}, \quad (1.8)$$

где

$$\psi^r = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi + \psi^*), \quad \psi^i = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi - \psi^*). \quad (1.9)$$

Указанный переход от представления (1.6) осуществляется с помощью унитарного преобразования базиса в пространстве состояний

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} I_4 & I_4 \\ I_4 & -I_4 \end{pmatrix}, \quad U^{-1} = U^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} I_4 & I_4 \\ I_4 & -I_4 \end{pmatrix}. \quad (1.10)$$

Матрицы Γ_k при этом принимают вид

$$\Gamma_0 = \sigma_1 \otimes \gamma_0, \quad \Gamma_1 = \sigma_1 \otimes \gamma_1, \quad \Gamma_2 = I_2 \otimes \gamma_2. \quad (1.11)$$



Лагранжиан уравнения (1.5)

$$L = -\bar{\Psi} \gamma_k \partial_k \Psi = F \Psi^+ \eta_k \partial_k \Psi \quad (1.12)$$

эквивалентен лагранжиану

$$L = -\bar{\Psi} \gamma_k \partial_k \Psi = -\Psi^+ \gamma_0 \gamma_k \partial_k \Psi \quad (1.13)$$

исходного уравнения (1.2) при выборе в базисе (1.8) матрицы билинейной формы η в виде

$$\eta = I_2 \otimes \gamma_0. \quad (1.14)$$

Уравнение (1.5) с волновой функцией (1.8), матрицами (1.11) и лагранжианом (1.12), (1.14) будем называть вещественной формой безмассового уравнения Дирака в пространстве размерности 2+1, поскольку соответствующая (1.5) система 8-ми уравнений, записанных в явном виде, является вещественной. Данную форму мы и будем использовать при установлении группы внутренней симметрии данного уравнения.

Для решения поставленной задачи будем использовать также фермионный базис, в котором диракоподобные матрицы Γ_k , по определению, имеют структуру

$$\Gamma_k = I_2 \otimes \gamma_k. \quad (1.15)$$

Переход от представления (1.8) в фермионный базис может быть осуществлен посредством унитарного преобразования

$$A = \frac{1}{2} [I_2 \otimes (I_4 + i\gamma_2) + \sigma_1 \otimes (I_4 - i\gamma_2)], \quad (1.16)$$
$$A^{-1} = A^+ = \frac{1}{2} [I_2 \otimes (I_4 - i\gamma_2) + \sigma_1 \otimes (I_4 + i\gamma_2)].$$

Матрица билинейной формы η в фермионном базисе принимает вид

$$\eta = \sigma_1 \otimes \gamma_0. \quad (1.17)$$

Инвариантность уравнения (1.5) с матрицами (1.11) относительно преобразований внутренней симметрии

$$\Psi'(x_k) = Q\Psi(x_k) \quad (1.18)$$

обеспечивается матрицами четырех типов

$$Q_1 = q^{(1)} \otimes I_4, Q_2 = q^{(2)} \otimes i\gamma_3\gamma_5, Q_3 = q^{(3)} \otimes \gamma_3, Q_4 = q^{(4)} \otimes \gamma_5, \quad (1.19)$$

где $\gamma_3 = \sigma_2 \otimes \sigma_3$, $\gamma_5 = \gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$, $q^{(\alpha)}$ ($\alpha = 1 \div 4$) – произвольные матрицы 2×2 , на которые накладываются лишь ограничения, связанные с сохранением вещественного харак-



тера уравнения (1.5). При этом матрицы Q_1 и Q_2 удовлетворяют условиям коммутации, а матрицы Q_3 и Q_4 условиям антикоммутации с матрицами Γ_k :

$$\begin{aligned} [Q_1, \Gamma_k]_- &= [Q_2, \Gamma_k]_- = 0, \\ [Q_3, \Gamma_k]_+ &= [Q_4, \Gamma_k]_+ = 0 \end{aligned} \quad (1.20)$$

Параметризуя двумерные матрицы $q^{(\alpha)}$ посредством базисных элементов I_2 и σ_i ($i=1 \div 3$), получим 15 (без учета единичной) унитарных матриц однопараметрических преобразований внутренней симметрии уравнения (1.5) (генераторов), имеющих в фермионном базисе вид

$$\begin{aligned} J^1 &= \sigma_1 \otimes I_4, \quad J^2 = \sigma_2 \otimes I_4, \quad J^3 = \sigma_3 \otimes I_4, \\ L^1 &= iI_2 \otimes \gamma_3\gamma_5, \quad L^2 = i\sigma_1 \otimes \gamma_3\gamma_5, \quad L^3 = i\sigma_2 \otimes \gamma_3\gamma_5, \quad L^4 = i\sigma_3 \otimes \gamma_3\gamma_5, \\ K^1 &= I_2 \otimes \gamma_3, \quad K^2 = \sigma_1 \otimes \gamma_3, \quad K^3 = \sigma_2 \otimes \gamma_3, \quad K^4 = \sigma_3 \otimes \gamma_3, \\ I^1 &= I_2 \otimes \gamma_5, \quad I^2 = \sigma_1 \otimes \gamma_5, \quad I^3 = \sigma_2 \otimes \gamma_5, \quad I^4 = \sigma_3 \otimes \gamma_5. \end{aligned} \quad (1.21)$$

(Множитель i здесь вводится для обеспечения эрмитовости генераторов (1.21)).

Возвращаясь теперь обратно в базис (1.18), получим для генераторов (1.21) следующие выражения:

$$\begin{aligned} J^1 &= \sigma_1 \otimes I_4, \quad J^2 = -\sigma_3 \otimes \gamma_2, \quad J^3 = \sigma_2 \otimes \gamma_2, \\ L^1 &= iI_2 \otimes \gamma_3\gamma_5, \quad L^2 = i\sigma_1 \otimes \gamma_3\gamma_5, \quad L^3 = i\sigma_3 \otimes \gamma_0\gamma_1, \quad L^4 = -i\sigma_2 \otimes \gamma_0\gamma_1, \\ K^1 &= \sigma_1 \otimes \gamma_3, \quad K^2 = I_2 \otimes \gamma_3, \quad K^3 = -i\sigma_2 \otimes \gamma_2\gamma_3, \quad K^4 = -i\sigma_3 \otimes \gamma_2\gamma_3, \\ I^1 &= \sigma_1 \otimes \gamma_5, \quad I^2 = I_2 \otimes \gamma_5, \quad I^3 = -i\sigma_2 \otimes \gamma_2\gamma_5, \quad I^4 = -i\sigma_3 \otimes \gamma_2\gamma_5. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Условие сохранения вещественного характера уравнения (1.15) относительно матричных преобразований (1.18), задаваемых генераторами (1.22), накладывает на параметры этих преобразований ($\omega_N \rightarrow J^N, \theta_N \rightarrow L^N, \Lambda_N \rightarrow K^N, \Omega_N \rightarrow I^N$) следующие ограничения:

$$\begin{aligned} \omega_2, \omega_3, \theta_2, \theta_3, \Lambda_3, \Lambda_4, \Omega_2 - \\ \omega_1, \theta_1, \Lambda_2, \Omega_3, \Omega_4 - \end{aligned} \quad (1.23)$$

Таким образом, преобразования внутренней симметрии исследуемого безмассового уравнения Дирака в пространстве 2+1 описывается унитарной 15-параметрической группой, задаваемой эрмитовскими базисными операторами (1.22), которым соответствует 9 вещественных и 6 мнимых параметров (1.23).

Помимо фермионного базиса и представления (1.8) волновой функции, будем использовать также представление

$$\Psi = (\psi, \bar{\psi}) - \text{столбец}, \quad (1.24)$$



где $\bar{\psi} = \psi^+ \gamma_0$. Переход от представления (1.8) в представление (1.24) осуществляется с помощью унитарного преобразования

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} I_4 & I_4 \\ \gamma_0 & -\gamma_0 \end{pmatrix}, \quad S^{-1} = S^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} I_4 & \gamma_0 \\ I_4 & -\gamma_0 \end{pmatrix}. \quad (1.25)$$

В представлении (1.24) генераторы преобразований внутренней симметрии принимают вид

$$\begin{aligned} J^1 &= \sigma_3 \otimes I_4, \quad J^2 = -i\sigma_2 \otimes \gamma_2 \gamma_0, \quad J^3 = i\sigma_1 \otimes \gamma_2 \gamma_0, \\ L^1 &= iI_2 \otimes \gamma_3 \gamma_5, \quad L^2 = i\sigma_3 \otimes \gamma_3 \gamma_5, \quad L^3 = \sigma_2 \otimes \gamma_1, \quad L^4 = -\sigma_1 \otimes \gamma_1, \\ K^1 &= I_2 \otimes \gamma_3, \quad K^2 = \sigma_3 \otimes \gamma_3, \quad K^3 = i\sigma_2 \otimes \gamma_5 \gamma_1, \quad K^4 = -i\sigma_1 \otimes \gamma_5 \gamma_1, \\ I^1 &= I_2 \otimes \gamma_5, \quad I^2 = \sigma_3 \otimes \gamma_5, \quad I^3 = i\sigma_2 \otimes \gamma_1 \gamma_3, \quad I^4 = -i\sigma_1 \otimes \gamma_1 \gamma_3. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Рассматривая генераторы (1.26) как матричные базисные операторы, составим из них и соответствующих им параметров, включая сюда и единичное преобразование с вещественным параметром ω_0 , матрицы Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 конечных преобразований внутренней симметрии

$$Q_1 = \sum_{A=0}^3 \omega_A J^A, \quad Q_2 = \sum_{A=1}^4 \theta_A L^A, \quad Q_3 = \sum_{A=1}^4 \Lambda_A K^A, \quad Q_4 = \sum_{A=1}^4 \Omega_A I^A. \quad (1.27)$$

В результате, введя обозначения

$$\begin{aligned} a_1 &= \omega_0 + \omega_1, \quad a_2 = i\theta_1 + i\theta_2, \quad a_3 = \Lambda_1 + \Lambda_2, \quad a_4 = \Omega_1 + \Omega_2, \\ b_1 &= -\omega_2 + i\omega_3, \quad b_2 = -i\theta_3 - \theta_4, \quad b_3 = \Lambda_3 - i\Lambda_4, \quad b_4 = \Omega_3 - i\Omega_4, \end{aligned} \quad (1.28)$$

для матриц Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 будем иметь выражения

$$\begin{aligned} Q_1 &= \begin{pmatrix} a_1 I_4 & b_1 \gamma_2 \gamma_0 \\ -b_1^* \gamma_2 \gamma_0 & a_1^* I_4 \end{pmatrix}, \quad Q_2 = \begin{pmatrix} a_2 \gamma_3 \gamma_5 & b_2 \gamma_1 \\ b_2^* \gamma_1 & -a_2^* \gamma_3 \gamma_5 \end{pmatrix}, \\ Q_3 &= \begin{pmatrix} a_3 \gamma_3 & b_3 \gamma_5 \gamma_1 \\ -b_3^* \gamma_5 \gamma_1 & a_3^* \gamma_3 \end{pmatrix}, \quad Q_4 = \begin{pmatrix} a_4 \gamma_5 & b_4 \gamma_1 \gamma_3 \\ b_4^* \gamma_1 \gamma_3 & -a_4^* \gamma_5 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (1.29)$$

Отсюда получаем следующий явный вид конечных преобразований внутренней симметрии безмассового уравнения Дирака в пространстве 2+1:

$$\begin{aligned} \psi' &= a_1 \psi + a_2 \gamma_3 \gamma_5 \psi + a_3 \gamma_3 \psi + a_4 \gamma_5 \psi + b_1 \gamma_2 \gamma_0 \bar{\psi} + b_2 \gamma_1 \bar{\psi} + b_3 \gamma_5 \gamma_1 \bar{\psi} + b_4 \gamma_1 \gamma_3 \bar{\psi}, \\ \bar{\psi}' &= -b_1^* \gamma_2 \gamma_0 \psi + b_2^* \gamma_1 \psi - b_3^* \gamma_5 \gamma_1 \psi + b_4^* \gamma_1 \gamma_3 \psi + a_1^* \bar{\psi} - a_2^* \gamma_3 \gamma_5 \bar{\psi} + a_3^* \gamma_3 \bar{\psi} - a_4^* \gamma_5 \bar{\psi}. \end{aligned} \quad (1.30)$$

Требование инвариантности лагранжиана теории относительно преобразований (1.30) накладывает на матрицы Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 условие



$$(Q_1 + Q_2^+ + Q_3 + Q_4)^+ Q_k (Q_1 + Q_2^+ + Q_3 + Q_4) = \eta_k, \quad (1.31)$$

которое с учетом (1.20) эквивалентно двум условиям

$$Q_1^+ \eta Q_1 + Q_2^+ \eta Q_2 - Q_3^+ \eta Q_3 - Q_4^+ \eta Q_4 + Q_1^+ \eta Q_2 + Q_2^+ \eta Q_1 - Q_3^+ \eta Q_4 - Q_4^+ \eta Q_3 = \eta, \quad (1.32)$$

$$-Q_1^+ \eta Q_3 - Q_1^+ \eta Q_4 - Q_2^+ \eta Q_3 - Q_2^+ \eta Q_4 + Q_3^+ \eta Q_1 + Q_3^+ \eta Q_2 + Q_4^+ \eta Q_1 + Q_4^+ \eta Q_2 = 0. \quad (1.33)$$

При этом эрмитовски сопряженные матрицы $Q_1^+, Q_2^+, Q_3^+, Q_4^+$ имеют вид

$$Q_1^+ = \begin{pmatrix} a_1^* I_4 & b_1 \gamma_2 \gamma_0 \\ -b_1^* \gamma_2 \gamma_0 & a_1 I_4 \end{pmatrix}, \quad Q_2^+ = \begin{pmatrix} -a_2^* \gamma_3 \gamma_5 & b_2 \gamma_1 \\ b_2^* \gamma_1 & a_2 \gamma_3 \gamma_5 \end{pmatrix}, \quad (1.34)$$

$$Q_3^+ = \begin{pmatrix} a_3^* \gamma_3 & b_3 \gamma_5 \gamma_1 \\ -b_3^* \gamma_5 \gamma_1 & a_3 \gamma_3 \end{pmatrix}, \quad Q_4^+ = \begin{pmatrix} a_4^* \gamma_5 & -b_4 \gamma_1 \gamma_3 \\ -b_4^* \gamma_1 \gamma_3 & -a_4 \gamma_5 \end{pmatrix}.$$

Подстановка выражений (1.29) и (1.30) для матриц $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_1^+, Q_2^+, Q_3^+, Q_4^+$ в условие (1.32) приводит к следующим ограничениям на параметры преобразований (1.30):

$$|a_1|^2 + |a_2|^2 + |a_3|^2 + |a_4|^2 - |b_1|^2 - |b_2|^2 - |b_3|^2 - |b_4|^2 = 1, \quad (1.35)$$

$$a_1^* a_2 - a_2^* a_1 + a_3^* a_4 - a_4^* a_3 + b_1 b_2^* - b_2 b_1^* + b_3 b_4^* - b_4 b_3^* = 0.$$

Соотношения (1.35) содержат 2 независимых условия. Аналогично из (1.33) получаем соотношения

$$a_1^* a_3 + a_3^* a_1 - a_2^* a_4 - a_4^* a_2 + b_1 b_3^* + b_3 b_1^* - b_2 b_4^* - b_4 b_2^* = 0,$$

$$a_1^* a_4 + a_4^* a_1 + a_2^* a_3 + a_3^* a_2 - b_1 b_4^* - b_4 b_1^* - b_2 b_3^* - b_3 b_2^* = 0, \quad (1.36)$$

$$b_1^* a_4 - a_1 b_4^* + a_3 b_2^* - a_2 b_3^* = 0,$$

которые содержат 4 независимых условия на параметры преобразований (1.30).

Таким образом, внутренняя симметрия лагранжиана безмассового уравнения Дирака в пространстве размерности 2+1 описывается 10-параметрической группой преобразований, которая получается в результате требования выполнения условий (1.32), (1.33).

Математическая структура данной группы легко устанавливается, если перейти к рассмотрению бесконечно малых однопараметрических преобразований $\delta Q = 1 + \omega_A J^A$, для которых условие (1.31) принимает вид

$$(\omega_A J^A)^+ \eta = -\omega_A \eta J^A, \quad (\Theta_A L^A)^+ \eta = -\Theta_A \eta L^A, \quad (1.37)$$

$$(\Omega_A I^A)^+ \eta = \Omega_A \eta I^A, \quad (\Lambda_A K^A)^+ \eta = \Lambda_A \eta K^A. \quad (1.38)$$



Прямая проверка показывает, что условия (1.37), (1.38) с учетом (1.23) выполняются для десяти однопараметрических преобразований, определяемых генераторами $J^1, J^2, J^3, L^2, L^3, L^4, K^2, K^3, K^4, I^1$, которые удовлетворяют алгебре генераторов группы $SO(2,5)$. Учитывая же, что из десяти параметров данных преобразований шесть $(\omega_2, \omega_3, \theta_3, \theta_4, \Lambda_3, \Lambda_4)$ являются вещественными и четыре $(\omega_1, \theta_2, \Lambda_2, \Omega_1)$ – мнимыми, приходим к выводу, что группа преобразований внутренней симметрии лагранжиана безмассового уравнения Дирака в пространстве размерности 2+1 изоморфна группе $SO(3,2)$.

Полную группу симметрии лагранжиана уравнения Дирака для частицы с ненулевой массой легко получить из установленной группы $SO(3,2)$ путем исключения преобразований, связанных с генераторами K^A, I^A , антикоммутирующих с матрицами Γ_k . В результате остается 6-параметрическая унитарная группа, задаваемая генераторами $J^1, J^2, J^3, L^2, L^3, L^4$, которым соответствуют 4 вещественных $(\omega_2, \omega_3, \theta_3, \theta_4)$ и два мнимых (ω_1, θ_2) параметра. Данная группа локально изоморфна группе $SO(2,1) \otimes SO(2,1)$.

2. Внутренняя симметрия системы двух уравнений Дирака в пространстве размерности 2+1

Рассмотрим внутреннюю симметрию системы двух безмассовых уравнений Дирака в пространстве размерности 2+1, которую во многих источниках используют для описания решеточной структуры графена.

Итак, имеем систему

$$\begin{cases} \gamma_k \partial_k \psi_1 = 0, \\ \gamma_k \partial_k \psi_2 = 0, \end{cases} \quad (2.1)$$

где ψ_1 и ψ_2 – биспиноры первого ранга, γ_k – матрицы 4×4 , удовлетворяющие алгебре Дирака, индекс k пробегает значения 0, 1, 2. Метрику пространства и матрицы γ_k выберем в виде (1.3). Взяв от (2.1) комплексное сопряжение и учитывая мнимый характер временной координаты x_0 , для сопряженных функций ψ_1^*, ψ_2^* получим уравнения

$$\begin{cases} (-\gamma_0 \partial_0 - \gamma_1 \partial_1 + \gamma_2 \partial_2) \psi_1^* = 0, \\ (-\gamma_0 \partial_0 - \gamma_1 \partial_1 + \gamma_2 \partial_2) \psi_2^* = 0. \end{cases} \quad (2.2)$$

Рассматривая уравнения (2.1) и (2.2) совместно, придем к 16-компонентной системе, которую можно представить в универсальной матричной форме (1.5). При выборе волновой функции Ψ в виде

$$\Psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_1^*, \psi_2^*) \text{ – столбец} \quad (2.3)$$

для матриц Γ_k в (1.5) будем иметь выражения



$$\Gamma_0 = \gamma_0 \otimes \gamma_0, \Gamma_1 = \gamma_0 \otimes \gamma_1, \Gamma_2 = I_4 \otimes \gamma_2. \quad (2.4)$$

Далее опять перейдем к представлению, в котором вещественные и мнимые компоненты волновой функции разделены:

$$\Psi = (\psi_1^r, \psi_1^i, \psi_2^r, \psi_2^i) - \quad (2.5)$$
$$\psi_{1,2}^r = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{1,2} + \psi_{1,2}^*), \quad \psi_{1,2}^i = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{1,2} - \psi_{1,2}^*).$$

Указанный переход от представления (2.3) осуществляется с помощью унитарного преобразования базиса в пространстве состояний

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} I_8 & I_8 \\ I_8 & -I_8 \end{pmatrix}, \quad U^{-1} = U^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} I_8 & I_8 \\ I_8 & -I_8 \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Матрицы Γ_k при этом принимают вид

$$\Gamma_0 = \gamma_5 \otimes \gamma_0, \Gamma_1 = \gamma_5 \otimes \gamma_1, \Gamma_2 = I_4 \otimes \gamma_2. \quad (2.7)$$

Лагранжиан уравнения (1.5) с матрицами (2.7)

$$L = \bar{\Psi} \left(-\gamma_0 \partial_t + \gamma_k \partial_k \right) \Psi + \bar{\Psi} \eta \Psi \quad (2.8)$$

эквивалентен лагранжиану исходной системы (2.1)

$$L = L_1 + L_2 = -\bar{\psi}_1 \gamma_k \partial_k \psi_1 - \bar{\psi}_2 \gamma_k \partial_k \psi_2 = -\bar{\psi}_1^+ \gamma_0 \gamma_k \partial_k \psi_1 - \bar{\psi}_2^+ \gamma_0 \gamma_k \partial_k \psi_2 \quad (2.9)$$

при выборе матрицы билинейной формы η в (2.8) в виде

$$\eta = I_4 \otimes \gamma_0, \quad (2.10)$$

который инвариантен относительно преобразования (2.6).

Уравнение (1.5) с волновой функцией (2.5), матрицами Γ_k (2.7) и лагранжианом (2.8), (2.10) будем, как и в случае одного уравнения Дирака, называть вещественной формой исходной системы (2.1). Эту форму мы опять-таки будем использовать при установлении группы внутренней симметрии лагранжевой формулировки системы (2.1).

Для решения поставленной задачи будем использовать также фермионный базис, в котором диракоподобные матрицы Γ_k , по определению имеют структуру

$$\Gamma_k = I_4 \otimes \gamma_k. \quad (2.11)$$

Переход от представления (2.5) в фермионный базис может быть осуществлен посредством унитарного преобразования



$$A = \frac{1}{2}[I_4 \otimes (I_4 + i\gamma_2) + \gamma_5 \otimes (I_4 - i\gamma_2)], \quad (2.12)$$
$$A^{-1} = A^+ = \frac{1}{2}[I_4 \otimes (I_4 - i\gamma_2) + \gamma_5 \otimes (I_4 + i\gamma_2)].$$

Матрица билинейной формы η при этом принимает вид

$$\eta = \gamma_5 \otimes \gamma_0. \quad (2.13)$$

Инвариантность уравнения (1.5) с матрицами (2.7) относительно преобразований внутренней симметрии (1.18) обеспечивается матрицами четырех типов (1.19), где $q^{(\alpha)}$ ($\alpha = 1 \div 4$) – комплексные матрицы 4×4 , на которые накладываются лишь ограничения, связанные с сохранением вещественного характера уравнения (1.5). При этом матрицы Q_1 и Q_2 удовлетворяют условиям коммутации, а матрицы Q_3 и Q_4 – условиям антикоммутации с матрицами Γ_k (2.7).

Параметризуя четырехмерные матрицы $q^{(\alpha)}$ посредством базисных элементов e_N ($N = 1 \div 16$)

$$\begin{aligned} e_1 &= I_4, e_2 = \gamma_0, e_3 = \gamma_1, e_4 = \gamma_2, e_5 = \gamma_3, e_6 = i\gamma_0\gamma_3, \\ e_7 &= i\gamma_1\gamma_3, e_8 = i\gamma_2\gamma_3, e_9 = \gamma_5, e_{10} = i\gamma_0\gamma_5, e_{11} = i\gamma_1\gamma_5, \\ e_{12} &= i\gamma_2\gamma_5, e_{13} = i\gamma_3\gamma_5, e_{14} = i\gamma_0\gamma_1, e_{15} = i\gamma_1\gamma_2, e_{16} = i\gamma_2\gamma_0, \end{aligned} \quad (2.14)$$

получим 64 базисных оператора преобразований внутренней симметрии уравнения (1.5), (2.7), имеющих в фермионном базисе вид

$$J^N = e_N \otimes I_4, L^N = e_N \otimes i\gamma_3\gamma_5, K^N = e_N \otimes \gamma_3, I^N = e_N \otimes \gamma_5. \quad (2.15)$$

Возвращаясь теперь обратно в базис (2.5), получим для операторов (2.15) выражения:

$$\begin{aligned} J^1 &= I_4 \otimes I_4, J^2 = -i\gamma_0\gamma_5 \otimes \gamma_2, J^3 = -i\gamma_1\gamma_5 \otimes \gamma_2, J^4 = -i\gamma_2\gamma_5 \otimes \gamma_2, \\ J^5 &= -i\gamma_3\gamma_5 \otimes \gamma_2, J^6 = i\gamma_0\gamma_3 \otimes I_4, J^7 = i\gamma_1\gamma_3 \otimes I_4, J^8 = i\gamma_2\gamma_3 \otimes I_4, \\ J^9 &= \gamma_5 \otimes I_4, J^{10} = \gamma_0 \otimes \gamma_2, J^{11} = \gamma_1 \otimes \gamma_2, J^{12} = \gamma_2 \otimes \gamma_2, \\ J^{13} &= \gamma_3 \otimes \gamma_2, J^{14} = i\gamma_0\gamma_1 \otimes I_4, J^{15} = i\gamma_1\gamma_2 \otimes I_4, J^{16} = i\gamma_2\gamma_0 \otimes I_4; \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} L^1 &= I_4 \otimes i\gamma_3\gamma_5, L^2 = \gamma_0\gamma_5 \otimes \gamma_1\gamma_0, L^3 = \gamma_1\gamma_5 \otimes \gamma_1\gamma_0, L^4 = \gamma_2\gamma_5 \otimes \gamma_1\gamma_0, \\ L^5 &= \gamma_3\gamma_5 \otimes \gamma_1\gamma_0, L^6 = -\gamma_0\gamma_3 \otimes \gamma_3\gamma_5, L^7 = -\gamma_1\gamma_3 \otimes \gamma_3\gamma_5, L^8 = -\gamma_2\gamma_3 \otimes \gamma_3\gamma_5, \\ L^9 &= i\gamma_5 \otimes \gamma_3\gamma_5, L^{10} = i\gamma_0 \otimes \gamma_1\gamma_0, L^{11} = i\gamma_1 \otimes \gamma_1\gamma_0, L^{12} = i\gamma_2 \otimes \gamma_1\gamma_0, \\ L^{13} &= i\gamma_3 \otimes \gamma_1\gamma_0, L^{14} = -\gamma_0\gamma_1 \otimes \gamma_3\gamma_5, L^{15} = -\gamma_1\gamma_2 \otimes \gamma_3\gamma_5, L^{16} = -\gamma_2\gamma_0 \otimes \gamma_3\gamma_5; \end{aligned} \quad (2.17)$$



$$\begin{aligned}
 K^1 &= \gamma_5 \otimes \gamma_3, & K^2 &= -i\gamma_0 \otimes \gamma_2\gamma_3, & K^3 &= -i\gamma_1 \otimes \gamma_2\gamma_3, & K^4 &= -i\gamma_2 \otimes \gamma_2\gamma_3, \\
 K^5 &= -i\gamma_3 \otimes \gamma_2\gamma_3, & K^6 &= -i\gamma_1\gamma_2 \otimes \gamma_3, & K^7 &= i\gamma_0\gamma_2 \otimes \gamma_3, & K^8 &= -i\gamma_0\gamma_1 \otimes \gamma_3, \\
 K^9 &= I_4 \otimes \gamma_3, & K^{10} &= \gamma_0\gamma_5 \otimes \gamma_2\gamma_3, & K^{11} &= \gamma_1\gamma_5 \otimes \gamma_2\gamma_3, & K^{12} &= \gamma_2\gamma_5 \otimes \gamma_2\gamma_3, \\
 K^{13} &= \gamma_3\gamma_5 \otimes \gamma_2\gamma_3, & K^{14} &= -i\gamma_2\gamma_3 \otimes \gamma_3, & K^{15} &= -i\gamma_0\gamma_3 \otimes \gamma_3, & K^{16} &= -i\gamma_1\gamma_3 \otimes \gamma_3;
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
 I^1 &= \gamma_5 \otimes \gamma_5, & I^2 &= -i\gamma_0 \otimes \gamma_2\gamma_5, & I^3 &= -i\gamma_1 \otimes \gamma_2\gamma_5, & I^4 &= -i\gamma_2 \otimes \gamma_2\gamma_5, \\
 I^5 &= -i\gamma_3 \otimes \gamma_2\gamma_5, & I^6 &= -i\gamma_1\gamma_2 \otimes \gamma_5, & I^7 &= i\gamma_0\gamma_2 \otimes \gamma_5, & I^8 &= -i\gamma_0\gamma_1 \otimes \gamma_5, \\
 I^9 &= I_4 \otimes \gamma_5, & I^{10} &= \gamma_0\gamma_5 \otimes \gamma_2\gamma_5, & I^{11} &= \gamma_1\gamma_5 \otimes \gamma_2\gamma_5, & I^{12} &= \gamma_2\gamma_5 \otimes \gamma_2\gamma_5, \\
 I^{13} &= \gamma_3\gamma_5 \otimes \gamma_2\gamma_5, & I^{14} &= -i\gamma_2\gamma_3 \otimes \gamma_5, & I^{15} &= -i\gamma_0\gamma_3 \otimes \gamma_5, & I^{16} &= -i\gamma_1\gamma_3 \otimes \gamma_5.
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Условие сохранения вещественного характера уравнения (1.5) относительно матричных преобразований (1.18), задаваемых базисными операторами (2.16) – (2.19), не считая единичного J^1 , накладывает на параметры $(\omega_N \rightarrow J^N, \theta_N \rightarrow L^N, \Lambda_N \rightarrow K^N, \Omega_N \rightarrow I^N)$ следующие ограничения:

$$\begin{aligned}
 &\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_8, \omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{13}, \omega_{15}, \omega_{16}, \\
 &\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_5, \theta_8, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{13}, \theta_{15}, \theta_{16}, \\
 &\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_5, \Lambda_8, \Lambda_{10}, \Lambda_{11}, \Lambda_{13}, \Lambda_{15}, \Lambda_{16}, \\
 &\Omega_4, \Omega_6, \Omega_7, \Omega_9, \Omega_{12}, \Omega_{14} \text{ – вещественные;} \\
 &\omega_4, \omega_6, \omega_7, \omega_9, \omega_{12}, \omega_{14}, \theta_4, \theta_6, \theta_7, \theta_9, \theta_{12}, \theta_{14}, \\
 &\Lambda_4, \Lambda_6, \Lambda_7, \Lambda_9, \Lambda_{12}, \Lambda_{14}, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_5, \Omega_8, \\
 &\Omega_{10}, \Omega_{11}, \Omega_{13}, \Omega_{15}, \Omega_{16} \text{ – мнимые.}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Таким образом, преобразования внутренней симметрии исследуемой системы двух безмассовых уравнений Дирака в пространстве 2+1 описывается унитарной 63-параметрической группой, задаваемой эрмитовскими базисными операторами (2.16) – (2.19), которым соответствует 35 вещественных и 28 мнимых параметров (2.20).

В дальнейшем будем работать в представлении

$$\Psi = (\psi_1, \psi_2, \bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2) \text{ – столбец,} \tag{2.21}$$

где $\bar{\psi}_{1,2} = \psi_{1,2}^+ \gamma_0$. Переход от представления (2.5) в представление (2.21) осуществляется с помощью унитарного преобразования

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} I_8 & I_8 \\ I_2 \otimes \gamma_0 & -I_2 \otimes \gamma_0 \end{pmatrix}, \quad S^{-1} = S^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} I_8 & I_2 \otimes \gamma_0 \\ I_8 & -I_2 \otimes \gamma_0 \end{pmatrix}. \tag{2.22}$$

В представлении (2.21) для операторов (2.16) – (2.19) получим выражения



$$\begin{aligned} J^1 &= I_4 \otimes I_4, & J^2 &= -i\gamma_5 \otimes \gamma_0\gamma_2, & J^3 &= i\gamma_1 \otimes \gamma_0\gamma_2, & J^4 &= i\gamma_2 \otimes \gamma_0\gamma_2, \\ J^5 &= i\gamma_3 \otimes \gamma_0\gamma_2, & J^6 &= i\gamma_3\gamma_5 \otimes I_4, & J^7 &= i\gamma_1\gamma_3 \otimes I_4, & J^8 &= i\gamma_2\gamma_3 \otimes I_4, \\ J^9 &= \gamma_0 \otimes I_4, & J^{10} &= -\gamma_0\gamma_5 \otimes \gamma_0\gamma_2, & J^{11} &= \gamma_0\gamma_1 \otimes \gamma_0\gamma_2, & J^{12} &= \gamma_0\gamma_2 \otimes \gamma_0\gamma_2, \\ J^{13} &= \gamma_0\gamma_3 \otimes \gamma_0\gamma_2, & J^{14} &= i\gamma_1\gamma_5 \otimes I_4, & J^{15} &= i\gamma_1\gamma_2 \otimes I_4, & J^{16} &= -i\gamma_2\gamma_5 \otimes I_4; \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} L^1 &= iI_4 \otimes \gamma_3\gamma_5, & L^2 &= -\gamma_5 \otimes \gamma_1, & L^3 &= \gamma_1 \otimes \gamma_1, & L^4 &= \gamma_2 \otimes \gamma_1, & L^5 &= \gamma_3 \otimes \gamma_1, \\ L^6 &= -\gamma_3\gamma_5 \otimes \gamma_3\gamma_5, & L^7 &= -\gamma_1\gamma_3 \otimes \gamma_3\gamma_5, & L^8 &= -\gamma_2\gamma_3 \otimes \gamma_3\gamma_5, & L^9 &= i\gamma_0 \otimes \gamma_3\gamma_5, \\ L^{10} &= i\gamma_0\gamma_5 \otimes \gamma_1, & L^{11} &= -i\gamma_0\gamma_1 \otimes \gamma_1, & L^{12} &= -i\gamma_0\gamma_2 \otimes \gamma_1, & L^{13} &= -i\gamma_0\gamma_3 \otimes \gamma_1, \\ L^{14} &= -\gamma_1\gamma_5 \otimes \gamma_3\gamma_5, & L^{15} &= -\gamma_1\gamma_2 \otimes \gamma_3\gamma_5, & L^{16} &= -\gamma_2\gamma_5 \otimes \gamma_3\gamma_5; \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} K^1 &= I_4 \otimes \gamma_3, & K^2 &= i\gamma_5 \otimes \gamma_1\gamma_5, & K^3 &= -i\gamma_1 \otimes \gamma_1\gamma_5, & K^4 &= -i\gamma_2 \otimes \gamma_1\gamma_5, \\ K^5 &= -i\gamma_3 \otimes \gamma_1\gamma_5, & K^6 &= i\gamma_3\gamma_5 \otimes \gamma_3, & K^7 &= -i\gamma_1\gamma_3 \otimes \gamma_3, & K^8 &= i\gamma_2\gamma_3 \otimes \gamma_3, \\ K^9 &= \gamma_0 \otimes \gamma_3, & K^{10} &= \gamma_0\gamma_5 \otimes \gamma_1\gamma_5, & K^{11} &= -\gamma_0\gamma_1 \otimes \gamma_1\gamma_5, & K^{12} &= -\gamma_0\gamma_2 \otimes \gamma_1\gamma_5, \\ K^{13} &= -\gamma_0\gamma_3 \otimes \gamma_1\gamma_5, & K^{14} &= i\gamma_1\gamma_5 \otimes \gamma_3, & K^{15} &= i\gamma_1\gamma_2 \otimes \gamma_3, & K^{16} &= -i\gamma_2\gamma_5 \otimes \gamma_3; \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} I^1 &= I_4 \otimes \gamma_5, & I^2 &= -i\gamma_5 \otimes \gamma_1\gamma_3, & I^3 &= i\gamma_1 \otimes \gamma_1\gamma_3, & I^4 &= i\gamma_2 \otimes \gamma_1\gamma_3, \\ I^5 &= i\gamma_3 \otimes \gamma_1\gamma_3, & I^6 &= i\gamma_3\gamma_5 \otimes \gamma_5, & I^7 &= -i\gamma_1\gamma_3 \otimes \gamma_5, & I^8 &= i\gamma_2\gamma_3 \otimes \gamma_5, \\ I^9 &= \gamma_0 \otimes \gamma_5, & I^{10} &= -\gamma_0\gamma_5 \otimes \gamma_1\gamma_3, & I^{11} &= \gamma_0\gamma_1 \otimes \gamma_1\gamma_3, & I^{12} &= \gamma_0\gamma_2 \otimes \gamma_1\gamma_3, \\ I^{13} &= \gamma_0\gamma_3 \otimes \gamma_1\gamma_3, & I^{14} &= i\gamma_1\gamma_5 \otimes \gamma_5, & I^{15} &= i\gamma_1\gamma_2 \otimes \gamma_5, & I^{16} &= -i\gamma_2\gamma_5 \otimes \gamma_5. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Составим из базисных операторов (2.23) – (2.26) и соответствующих им параметров (2.20), включая сюда вещественный параметр ω_1 , матрицы Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 преобразований внутренней симметрии системы двух безмассовых уравнений Дирака в пространстве 2+1. В результате, введя обозначения

$$\begin{aligned} a_1 &= \omega_1 + \omega_6 + \omega_9 - \omega_{15}, & b_1 &= -i\omega_2 + \omega_5 - \omega_{10} - i\omega_{13}, \\ a_2 &= -i\omega_7 - \omega_8 + \omega_{14} + i\omega_{16}, & b_2 &= \omega_3 - i\omega_4 - i\omega_{11} - \omega_{12}, \\ a_3 &= i\omega_7 - \omega_8 + \omega_{14} - i\omega_{16}, & b_3 &= \omega_3 + i\omega_4 - i\omega_{11} + \omega_{12}, \\ a_4 &= \omega_1 - \omega_6 + \omega_9 + \omega_{15}, & b_4 &= i\omega_2 - \omega_5 - \omega_{10} + i\omega_{13}; \\ a_5 &= i\theta_1 + i\theta_6 + i\theta_9 - i\theta_{15}, & b_5 &= -\theta_2 - i\theta_5 + i\theta_{10} - \theta_{13}, \\ a_6 &= \theta_7 - i\theta_8 + i\theta_{14} + \theta_{16}, & b_6 &= -i\theta_3 - \theta_4 - \theta_{11} + i\theta_{12}, \\ a_7 &= -\theta_7 - i\theta_8 + i\theta_{14} - \theta_{16}, & b_7 &= -i\theta_3 + \theta_4 - \theta_{11} - i\theta_{12}, \\ a_8 &= i\theta_1 - i\theta_6 + i\theta_9 + i\theta_{15}, & b_8 &= -\theta_2 + i\theta_5 + i\theta_{10} + \theta_{13}; \end{aligned} \quad (2.27)$$



$$\begin{aligned}
 a_9 &= \Lambda_1 + \Lambda_6 + \Lambda_9 - \Lambda_{15}, & b_9 &= i\Lambda_2 - \Lambda_5 + \Lambda_{10} + i\Lambda_{13}, \\
 a_{10} &= i\Lambda_7 - \Lambda_8 + \Lambda_{14} + i\Lambda_{16}, & b_{10} &= -\Lambda_3 - i\Lambda_4 + i\Lambda_{11} + \Lambda_{12}, \\
 a_{11} &= -i\Lambda_7 - \Lambda_8 + \Lambda_{14} - i\Lambda_{16}, & b_{11} &= -\Lambda_3 + i\Lambda_4 + i\Lambda_{11} - \Lambda_{12}, \\
 a_{12} &= \Lambda_1 - \Lambda_6 + \Lambda_9 + \Lambda_{15}, & b_{12} &= i\Lambda_2 + \Lambda_5 + \Lambda_{10} - i\Lambda_{13}; \\
 a_{13} &= \Omega_1 + \Omega_6 + \Omega_9 - \Omega_{15}, & b_{13} &= -i\Omega_2 + \Omega_5 - \Omega_{10} - i\Omega_{13}, \\
 a_{14} &= i\Omega_7 - \Omega_8 + \Omega_{14} + i\Omega_{16}, & b_{14} &= \Omega_3 - i\Omega_4 - i\Omega_{11} - \Omega_{12}, \\
 a_{15} &= -i\Omega_7 - \Omega_8 + \Omega_{14} - i\Omega_{16}, & b_{15} &= \Omega_3 + i\Omega_4 - i\Omega_{11} + \Omega_{12}, \\
 a_{16} &= \Omega_1 - \Omega_6 + \Omega_9 + \Omega_{15}, & b_{16} &= -i\Omega_2 - \Omega_5 - \Omega_{10} + i\Omega_{13},
 \end{aligned}$$

получим выражения:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \begin{pmatrix} a_1 I_4 & a_2 I_4 & b_1 \gamma_0 \gamma_2 & b_2 \gamma_0 \gamma_2 \\ a_3 I_4 & a_4 I_4 & b_3 \gamma_0 \gamma_2 & b_4 \gamma_0 \gamma_2 \\ -b_1^* \gamma_0 \gamma_2 & -b_2^* \gamma_0 \gamma_2 & a_1^* I_4 & a_2^* I_4 \\ -b_3^* \gamma_0 \gamma_2 & -b_4^* \gamma_0 \gamma_2 & a_3^* I_4 & a_4^* I_4 \end{pmatrix}, \\
 Q_2 &= \begin{pmatrix} a_5 \gamma_3 \gamma_5 & a_6 \gamma_3 \gamma_5 & b_5 \gamma_1 & b_6 \gamma_1 \\ a_7 \gamma_3 \gamma_5 & a_8 \gamma_3 \gamma_5 & b_7 \gamma_1 & b_8 \gamma_1 \\ b_5^* \gamma_1 & b_6^* \gamma_1 & -a_5^* \gamma_3 \gamma_5 & -a_6^* \gamma_3 \gamma_5 \\ b_7^* \gamma_1 & b_8^* \gamma_1 & -a_7^* \gamma_3 \gamma_5 & -a_8^* \gamma_3 \gamma_5 \end{pmatrix}, \\
 Q_3 &= \begin{pmatrix} a_9 \gamma_3 & a_{10} \gamma_3 & b_9 \gamma_1 \gamma_5 & b_{10} \gamma_1 \gamma_5 \\ a_{11} \gamma_3 & a_{12} \gamma_3 & b_{11} \gamma_1 \gamma_5 & b_{12} \gamma_1 \gamma_5 \\ -b_9^* \gamma_1 \gamma_5 & -b_{10}^* \gamma_1 \gamma_5 & a_9^* \gamma_3 & a_{10}^* \gamma_3 \\ -b_{11}^* \gamma_1 \gamma_5 & -b_{12}^* \gamma_1 \gamma_5 & a_{11}^* \gamma_3 & a_{12}^* \gamma_3 \end{pmatrix}, \\
 Q_4 &= \begin{pmatrix} a_{13} \gamma_5 & a_{14} \gamma_5 & b_{13} \gamma_1 \gamma_3 & b_{14} \gamma_1 \gamma_3 \\ a_{15} \gamma_5 & a_{16} \gamma_5 & b_{15} \gamma_1 \gamma_3 & b_{16} \gamma_1 \gamma_3 \\ b_{13}^* \gamma_1 \gamma_3 & b_{14}^* \gamma_1 \gamma_3 & -a_{13}^* \gamma_5 & -a_{14}^* \gamma_5 \\ b_{15}^* \gamma_1 \gamma_3 & b_{16}^* \gamma_1 \gamma_3 & -a_{15}^* \gamma_5 & -a_{16}^* \gamma_5 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Отсюда следует, что конечные преобразования внутренней симметрии рассматриваемой системы уравнений Дирака принимают вид

$$\begin{aligned}
 \psi_1' &= a_1 \psi_1 + a_5 \gamma_3 \gamma_5 \psi_1 + a_9 \gamma_3 \psi_1 + a_{11} \gamma_5 \psi_1 + a_2 \psi_2 + a_6 \gamma_3 \gamma_5 \psi_2 + \\
 &\quad + a_{10} \gamma_3 \psi_2 + a_{14} \gamma_5 \psi_2 + b_1 \gamma_0 \gamma_2 \bar{\psi}_1 + b_5 \gamma_1 \bar{\psi}_1 + b_9 \gamma_1 \gamma_5 \bar{\psi}_2 + \\
 &\quad + b_{13} \gamma_1 \gamma_3 \bar{\psi}_2 + b_2 \gamma_0 \gamma_2 \bar{\psi}_2 + b_6 \gamma_1 \bar{\psi}_2 + b_{10} \gamma_1 \gamma_5 \bar{\psi}_2 + b_{14} \gamma_1 \gamma_3 \bar{\psi}_2, \\
 \psi_2' &= a_3 \psi_1 + a_7 \gamma_3 \gamma_5 \psi_1 + a_{11} \gamma_3 \psi_1 + a_{15} \gamma_5 \psi_1 + a_4 \psi_2 + a_8 \gamma_3 \gamma_5 \psi_2 + \\
 &\quad + a_{12} \gamma_3 \psi_2 + a_{16} \gamma_5 \psi_2 + b_3 \gamma_0 \gamma_2 \bar{\psi}_1 + b_7 \gamma_1 \bar{\psi}_1 + b_{11} \gamma_1 \gamma_5 \bar{\psi}_2 +
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & + b_{15}\gamma_1\gamma_3\bar{\psi}_2 + b_4\gamma_0\gamma_2\bar{\psi}_2 + b_8\gamma_1\bar{\psi}_2 + b_{12}\gamma_1\gamma_5\bar{\psi}_2 + b_{16}\gamma_1\gamma_3\bar{\psi}_2, \\
 \bar{\psi}'_1 = & -b_1^*\gamma_0\gamma_2\psi_1 + b_5^*\gamma_1\psi_1 - b_9^*\gamma_1\gamma_5\psi_1 + b_1^*\gamma_1\gamma_3\psi_1 - b_2^*\gamma_0\gamma_2\psi_2 + \\
 & + b_6^*\gamma_1\psi_2 - b_{10}^*\gamma_1\gamma_5\psi_2 + b_{14}^*\gamma_1\gamma_3\psi_2 + a_1^*\bar{\psi}_1 - a_5^*\gamma_3\gamma_5\bar{\psi}_1 + \\
 & + a_9^*\gamma_3\bar{\psi}_1 - a_1^*\gamma_5\bar{\psi}_1 + a_2^*\bar{\psi}_2 - a_6^*\gamma_3\gamma_5\bar{\psi}_2 + a_1^*\gamma_3\bar{\psi}_2 - a_1^*\gamma_5\bar{\psi}_2, \\
 \bar{\psi}'_2 = & -b_3^*\gamma_0\gamma_2\psi_1 + b_7^*\gamma_1\psi_1 - b_{11}^*\gamma_1\gamma_5\psi_1 + b_{15}^*\gamma_1\gamma_3\psi_1 - b_4^*\gamma_0\gamma_2\psi_2 + \\
 & + b_8^*\gamma_1\psi_2 - b_{12}^*\gamma_1\gamma_5\psi_2 + b_{16}^*\gamma_1\gamma_3\psi_2 + a_3^*\bar{\psi}_1 - a_7^*\gamma_3\gamma_5\bar{\psi}_1 + \\
 & + a_{11}^*\gamma_3\bar{\psi}_1 - a_{15}^*\gamma_5\bar{\psi}_1 + a_4^*\bar{\psi}_2 - a_8^*\gamma_3\gamma_5\bar{\psi}_2 + a_{12}^*\gamma_3\bar{\psi}_2 - a_{16}^*\gamma_5\bar{\psi}_2,
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

где a_i и b_i ($i=1\div 16$) – произвольные комплексные числа.

Найдем, какие ограничения на параметры преобразований (2.29) накладывает условие (1.31) инвариантности лагранжиана теории. Учитывая, что Q_1 и Q_2 коммутируют, а Q_3 и Q_4 антикоммутируют с матрицами Γ_k , данное условие можем переписать в виде двух независимых условий (1.31) и (1.32), где Q_1^+ , Q_2^+ , Q_3^+ , Q_4^+ имеют вид

$$\begin{aligned}
 Q_1^+ &= \begin{pmatrix} a_1^*I_4 & a_3^*I_4 & b_1\gamma_0\gamma_2 & b_3\gamma_0\gamma_2 \\ a_2^*I_4 & a_4^*I_4 & b_2\gamma_0\gamma_2 & b_4\gamma_0\gamma_2 \\ -b_1^*\gamma_0\gamma_2 & -b_3^*\gamma_0\gamma_2 & a_1I_4 & a_3I_4 \\ -b_2^*\gamma_0\gamma_2 & -b_4^*\gamma_0\gamma_2 & a_2I_4 & a_4I_4 \end{pmatrix}, \\
 Q_2^+ &= \begin{pmatrix} -a_5^*\gamma_3\gamma_5 & -a_7^*\gamma_3\gamma_5 & b_5\gamma_1 & b_7\gamma_1 \\ -a_6^*\gamma_3\gamma_5 & -a_8^*\gamma_3\gamma_5 & b_6\gamma_1 & b_8\gamma_1 \\ b_5^*\gamma_1 & b_7^*\gamma_1 & a_5\gamma_3\gamma_5 & a_7\gamma_3\gamma_5 \\ b_6^*\gamma_1 & b_8^*\gamma_1 & a_6\gamma_3\gamma_5 & a_8\gamma_3\gamma_5 \end{pmatrix}, \\
 Q_3^+ &= \begin{pmatrix} a_9^*\gamma_3 & a_1^*\gamma_3 & b_9\gamma_1\gamma_5 & b_1\gamma_1\gamma_5 \\ a_{10}^*\gamma_3 & a_{12}^*\gamma_3 & b_{10}\gamma_1\gamma_5 & b_{12}\gamma_1\gamma_5 \\ -b_9^*\gamma_1\gamma_5 & -b_1^*\gamma_1\gamma_5 & a_9\gamma_3 & a_1\gamma_3 \\ -b_{10}^*\gamma_1\gamma_5 & -b_{12}^*\gamma_1\gamma_5 & a_{10}\gamma_3 & a_{12}\gamma_3 \end{pmatrix}, \\
 Q_4^+ &= \begin{pmatrix} a_{13}^*\gamma_5 & a_{15}^*\gamma_5 & -b_{13}\gamma_1\gamma_3 & -b_{15}\gamma_1\gamma_3 \\ a_{14}^*\gamma_5 & a_{16}^*\gamma_5 & -b_{14}\gamma_1\gamma_3 & -b_{16}\gamma_1\gamma_3 \\ -b_{13}^*\gamma_1\gamma_3 & -b_{15}^*\gamma_1\gamma_3 & -a_{13}\gamma_5 & -a_{15}\gamma_5 \\ -b_{14}^*\gamma_1\gamma_3 & -b_{16}^*\gamma_1\gamma_3 & -a_{14}\gamma_5 & -a_{16}\gamma_5 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.30}$$



Матрыца билинейной формы в представлении (2.21) принимает вид

$$\eta = I_4 \otimes \gamma_0. \quad (2.31)$$

Подставляя выражения (2.28), (2.30) и (2.31) в условия (1.32) и (1.33), получаем следующие ограничения на параметры преобразований (2.29):

$$\begin{aligned} & |a_1|^2 + |a_3|^2 + |a_5|^2 + |a_7|^2 + |a_9|^2 + |a_{11}|^2 + |a_{13}|^2 + |a_{15}|^2 - \\ & - |b_1|^2 - |b_3|^2 - |b_5|^2 - |b_7|^2 - |b_9|^2 - |b_{11}|^2 - |b_{13}|^2 - |b_{15}|^2 = 1, \\ & |a_2|^2 + |a_4|^2 + |a_6|^2 + |a_8|^2 + |a_{10}|^2 + |a_{12}|^2 + |a_{14}|^2 + |a_{16}|^2 - \\ & - |b_2|^2 - |b_4|^2 - |b_6|^2 - |b_8|^2 - |b_{10}|^2 - |b_{12}|^2 - |b_{14}|^2 - |b_{16}|^2 = 1, \\ & a_1^* b_2 + a_3^* b_4 - a_2^* b_1 - a_4^* b_3 - a_5^* b_6 - a_7^* b_8 + a_6^* b_5 + a_8^* b_7 - \\ & - a_9^* b_{10} - a_{11}^* b_{12} + a_{10}^* b_9 + a_{12}^* b_{11} + a_{13}^* b_{14} + a_{15}^* b_{16} - a_{14}^* b_{13} - a_{16}^* b_{15} = 0, \\ & a_1^* a_2 + a_3^* a_4 - b_2^* b_1 - b_4^* b_3 + a_5^* a_6 + a_7^* a_8 - b_6^* b_5 - b_8^* b_7 + \\ & + a_9^* a_{10} + a_{11}^* a_{12} - b_{10}^* b_9 - b_{12}^* b_{11} + a_{13}^* a_{14} + a_{15}^* a_{16} - b_{14}^* b_{13} - b_{16}^* b_{15} = 0, \\ & -a_1^* a_5 - a_3^* a_7 + b_5^* b_1 + b_7^* b_3 + a_5^* a_1 + a_7^* a_3 - b_1^* b_5 - b_3^* b_7 - \\ & - a_9^* a_{13} - a_{11}^* a_{15} + b_{13}^* b_9 + b_{15}^* b_{11} + a_{13}^* a_9 + a_{15}^* a_{11} - b_9^* b_{13} - b_{11}^* b_{15} = 0, \\ & -a_1^* a_6 - a_3^* a_8 + b_6^* b_1 + b_8^* b_3 + a_5^* a_2 + a_7^* a_4 - b_2^* b_5 - b_4^* b_7 - \\ & - a_9^* a_{14} - a_{11}^* a_{16} + b_{14}^* b_9 + b_{16}^* b_{11} + a_{13}^* a_{10} + a_{15}^* a_{12} - b_{10}^* b_{13} - b_{12}^* b_{15} = 0, \\ & a_1^* b_6 + a_3^* b_8 - a_6^* b_1 - a_8^* b_3 + a_5^* b_2 + a_7^* b_4 - a_2^* b_5 - a_4^* b_7 - \\ & - a_9^* b_{14} - a_{11}^* b_{16} + a_{14}^* b_9 + a_{16}^* b_{11} - a_{13}^* b_{10} - a_{15}^* b_{12} + a_{10}^* b_{13} + a_{12}^* b_{15} = 0, \\ & -a_2^* a_6 - a_4^* a_8 + b_6^* b_2 + b_8^* b_4 + a_6^* a_2 + a_8^* a_4 - b_2^* b_6 - b_4^* b_8 - \\ & - a_{10}^* a_{14} - a_{12}^* a_{16} + b_{14}^* b_{10} + b_{16}^* b_{12} + a_{14}^* a_{10} + a_{16}^* a_{12} - b_{10}^* b_{14} - b_{12}^* b_{16} = 0, \\ & -a_1^* a_9 - a_3^* a_{11} - b_9^* b_1 - b_{11}^* b_3 + a_5^* a_{13} + a_7^* a_{15} + b_{13}^* b_5 + b_{15}^* b_7 - \\ & - a_9^* a_1 - a_{11}^* a_3 - b_1^* b_9 - b_3^* b_{11} + a_{13}^* a_5 + a_{15}^* a_7 + b_5^* b_{13} + b_7^* b_{15} = 0, \\ & -a_1^* a_{10} - a_3^* a_{12} - b_{10}^* b_1 - b_{12}^* b_3 + a_5^* a_{14} + a_7^* a_{16} + b_{14}^* b_5 + b_{16}^* b_7 - \\ & - a_9^* a_2 - a_{11}^* a_4 - b_2^* b_9 - b_4^* b_{11} + a_{13}^* a_6 + a_{15}^* a_8 + b_6^* b_{13} + b_8^* b_{15} = 0, \\ & a_1^* b_{10} + a_3^* b_{12} + a_{10}^* b_1 + a_{12}^* b_3 + a_5^* b_{14} + a_7^* b_{16} + a_{14}^* b_5 + a_{16}^* b_7 - \\ & - a_9^* b_2 - a_{11}^* b_4 - a_2^* b_9 - a_4^* b_{11} - a_{13}^* b_6 - a_{15}^* b_8 - a_6^* b_{13} - a_8^* b_{15} = 0, \\ & -a_2^* a_{10} - a_4^* a_{12} - b_{10}^* b_2 - b_{12}^* b_4 + a_6^* a_{14} + a_8^* a_{16} + b_{14}^* b_6 + b_{16}^* b_8 - \\ & - a_{10}^* a_2 - a_{12}^* a_4 - b_2^* b_{10} - b_4^* b_{12} + a_{14}^* a_6 + a_{16}^* a_8 + b_6^* b_{14} + b_8^* b_{16} = 0, \\ & -a_1^* a_{13} - a_3^* a_{15} - b_{13}^* b_1 - b_{15}^* b_3 - a_5^* a_9 - a_7^* a_{11} - b_9^* b_5 - b_{11}^* b_7 - \\ & - a_9^* a_5 - a_{11}^* a_7 - b_5^* b_9 - b_7^* b_{11} - a_{13}^* a_1 - a_{15}^* a_3 - b_1^* b_{13} - b_3^* b_{15} = 0, \end{aligned} \quad (2.32)$$



$$\begin{aligned} & -a_1^* a_{14} - a_3^* a_{16} - b_{14}^* b_1 - b_{16}^* b_3 - a_5^* a_{10} - a_7^* a_{12} - b_{10}^* b_5 - b_{12}^* b_7 - \\ & -a_9^* a_6 - a_{11}^* a_8 - b_6^* b_9 - b_8^* b_{11} - a_{13}^* a_2 - a_{15}^* a_4 - b_2^* b_{13} - b_4^* b_{15} = 0, \\ & -a_1^* b_{14} - a_3^* b_{16} - a_{14}^* b_1 - a_{16}^* b_3 + a_5^* b_{10} + a_7^* b_{12} + a_{10}^* b_5 + a_{12}^* b_7 + \\ & + a_9^* b_6 + a_{11}^* b_8 + a_6^* b_9 + a_8^* b_{11} - a_{13}^* b_2 - a_{15}^* b_4 - a_2^* b_{13} - a_4^* b_{15} = 0, \\ & -a_2^* a_{14} - a_4^* a_{16} - b_{14}^* b_2 - b_{16}^* b_4 - a_6^* a_{10} - a_8^* a_{12} - b_{10}^* b_6 - b_{12}^* b_8 - \\ & -a_{10}^* a_6 - a_{12}^* a_8 - b_6^* b_{10} - b_8^* b_{12} - a_{14}^* a_2 - a_{16}^* a_4 - b_2^* b_{14} - b_4^* b_{16} = 0, \\ & -a_2^* b_{14} - a_4^* b_{16} - a_{14}^* b_2 - a_{16}^* b_4 + a_6^* b_{10} + a_8^* b_{12} + a_{10}^* b_6 + a_{12}^* b_8 = 0, \\ & -a_1^* b_{13} - a_3^* b_{15} - a_{13}^* b_1 - a_{15}^* b_3 + a_5^* b_9 + a_7^* b_{11} + a_9^* b_5 + a_{11}^* b_7 = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, на 64 параметра преобразования (2.29) накладывается 28 условий, в результате чего получается 36-параметрическая группа внутренней симметрии лагранжевой формулировки теории.

Для установления математической структуры данной группы перейдем к рассмотрению бесконечно малых однопараметрических преобразований, для которых условие инвариантности лагранжиана имеет вид (1.37), (1.38).

Непосредственная проверка показывает, что условия (1.37) и (1.38) выполняются для 36-ти однопараметрических преобразований, задаваемых генераторами

$$\begin{aligned} & J^2, J^3, J^5, J^6, J^7, J^9, J^{10}, J^{11}, J^{13}, J^{14}, \\ & L^2, L^3, L^5, L^6, L^7, L^9, L^{10}, L^{11}, L^{13}, L^{14}, \\ & K^2, K^3, K^5, K^6, K^7, K^9, K^{10}, K^{11}, K^{13}, K^{14}, \\ & I^1, I^4, I^8, I^{12}, I^{15}, I^{16}, \end{aligned} \tag{2.33}$$

которым соответствуют 20 вещественных ($\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{13}, \theta_2, \theta_3, \theta_5, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{13}, \Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_5, \Lambda_{10}, \Lambda_{11}, \Lambda_{13}, \Omega_4, \Omega_{12}$) и 16 мнимых ($\omega_6, \omega_7, \omega_9, \omega_{14}, \theta_6, \theta_7, \theta_9, \theta_{14}, \Lambda_6, \Lambda_7, \Lambda_9, \Lambda_{14}, \Omega_1, \Omega_8, \Omega_{15}, \Omega_{16}$) параметров. Указанные преобразования образуют группу, изоморфную группе $SO(5,4)$.

При переходе в пространство размерности 3+1 из рассматриваемых преобразований надо исключить те, что связаны с базисными операторами L^N, K^N . Тогда получим 16-параметрическую группу матричных преобразований внутренней симметрии системы двух безмассовых уравнений Дирака, определяемую генераторами

$$J^2, J^3, J^5, J^6, J^7, J^9, J^{10}, J^{11}, J^{13}, J^{14}, I^1, I^4, I^8, I^{12}, I^{15}, I^{16}. \tag{2.34}$$

При этом генератор I^1 коммутирует со всеми остальными в наборе (2.34), которые образуют 15-параметрическую унитарную группу с 8-ью вещественными ($\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{13}, \Omega_4, \Omega_{12}$) и 7-ью мнимыми ($\omega_6, \omega_7, \omega_9, \omega_{14}, \Omega_8, \Omega_{15}, \Omega_{16}$) параметрами, изоморфную группе $SO(4,2)$.

Полную группу внутренней симметрии лагранжиана системы двух уравнений Дирака с ненулевой массой в пространстве 2+1 можно получить из вышеустановленной



группы симметрии $SO(5,4)$ путем исключения преобразований, связанных с генераторами K^A, I^A , которые антикоммутируют с матрицами Γ_k . В результате получим 20-параметрическую группу преобразований, задаваемых генераторами

$$\begin{aligned} J^2, J^3, J^5, J^6, J^7, J^9, J^{10}, J^{11}, J^{13}, J^{14}, \\ L^2, L^3, L^5, L^6, L^7, L^9, L^{10}, L^{11}, L^{13}, L^{14}, \end{aligned} \quad (2.35)$$

с 12-тью вещественными ($\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{13}, \theta_2, \theta_3, \theta_5, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{13}$) и 8-мью мнимыми ($\omega_6, \omega_7, \omega_9, \omega_{14}, \theta_6, \theta_7, \theta_9, \theta_{14}$) параметрами, локально изоморфную группе $SO(3,2) \otimes SO(3,2)$.

3. Внутренняя симметрия уравнения Дирака–Кэлера в пространстве размерности 2+1

Тензорная форма уравнения Дирака–Кэлера в пространстве 2+1 для безмассового поля может быть получена из тензорной формы этого уравнения в пространстве 3+1 путем исключения из последнего всех величин, содержащих измерение x_3 . В результате получим 8-компонентную систему

$$\begin{aligned} \partial_k \Psi_k &= 0, \\ \partial_i \Psi_{[ki]} + \partial_k \Psi &= 0, \\ -\partial_k \Psi_i + \partial_i \Psi_k + \partial_j \Psi_{[kij]} &= 0, \\ \partial_k \Psi_{[ij]} + \partial_j \Psi_{[ki]} + \partial_i \Psi_{[jk]} &= 0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где индексы i, j, k пробегает значения 0, 1, 2; $\Psi, \Psi_k, \Psi_{[ki]}, \Psi_{[kij]}$ – соответственно скаляр, вектор, антисимметричные тензоры второго и третьего рангов в пространстве 2+1 (используем метрику пространства $g_{ki} = \text{diag}(1,1,1)$, поэтому не различаем ковариантные и контравариантные индексы).

Систему (3.1) можно записать в универсальной матричной форме релятивистского волнового уравнения (РВУ) первого порядка

$$\Gamma_k^{(8)} \partial_k \Psi^{(8)} = 0. \quad (3.2)$$

Вводя для тензорных компонент волновой функции

$$\Psi^{(8)} = (\Psi, \Psi_k, \Psi_{[ki]}, \Psi_{[kij]}) = (\Psi, \Psi_0, \Psi_1, \Psi_2, \Psi_{[12]}, \Psi_{[10]}, \Psi_{[20]}, \Psi_{[012]}), \quad (3.3)$$

собирательный индекс $A = (\tilde{0}, k, [ki], [kij])$, матрицы $\Gamma_k^{(8)}$ в (3.2) можно выразить через элементы полной матричной алгебры e^{AB} [8] следующим образом:

$$\Gamma_k = e^{\tilde{0}k} + e^{k\tilde{0}} - e^{i,[ki]} - e^{[ki],i} + \frac{1}{2} e^{[ij],[kij]} + \frac{1}{2} e^{[kij],[ij]}. \quad (3.4)$$



Матрица η билинейной вещественной лоренц-инвариантной формы в пространстве 2+1 находится тем же способом, что и система (3.1): из матрицы η , записанной в пространстве 3+1, исключаются строки и столбцы, обусловленные третьим пространственным измерением. В результате в базисе (3.3) получим

$$\eta = \text{diag}(-1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, -1). \quad (3.5)$$

Нетрудно убедиться, что матрицы Γ_k (3.4) и η (3.5) удовлетворяют перестановочным соотношениям

$$\Gamma_k^{(8)} \Gamma_i^{(8)} + \Gamma_i^{(8)} \Gamma_k^{(8)} = 2\delta_{ki} I_8, \quad (3.6)$$

$$\eta \Gamma_0^{(8)} = \Gamma_0^{(8)} \eta, \eta \Gamma_1^{(8)} = -\Gamma_1^{(8)} \eta, \eta \Gamma_2^{(8)} = -\Gamma_2^{(8)} \eta. \quad (3.7)$$

Из тензорного базиса (3.3) с помощью унитарного преобразования

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & i & -i & -i & i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i & i & -i & i & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ i & i & 0 & 0 & 0 & 0 & i & i \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ i & i & 0 & 0 & 0 & 0 & -i & -i \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

можно перейти в фермионный базис, в котором по определению матрицы $\Gamma_k^{(8)}$ имеют вид (1.15). Для матрицы η в этом базисе получается выражение

$$\eta = \sigma_3 \otimes \gamma_0. \quad (3.9)$$

Очевидно, что систему из двух безмассовых уравнений Дирака (2.1) также можно представить в виде 8-компонентного РВУ (1.5) с матрицами (1.15). Если при этом лагранжиан системы (2.1) выбрать в виде разности лагранжианов каждого из уравнений, т. е. положить

$$L = L_1 - L_2, \quad (3.10)$$

то для матрицы η получим выражение, совпадающее с (3.9).

Исследуем теперь вышеописанным методом внутреннюю симметрию уравнения Дирака-Кэлера (3.2).

Беря от уравнения (3.2) комплексное сопряжение и рассматривая сопряженное уравнение совместно с исходным, получим систему, которую можно представить в аналогичном (3.2) виде (1.5). Здесь $\Psi = (\Psi^{(8)}, \Psi^{(8)*})$ – 16-компонентная функция-



столбец и для матриц Γ_k имеют место выражения (2.4). Переходя к представлению, в котором вещественные и мнимые компоненты волновой функции разделены, т. е.

$$\Psi = (\Psi_r^{(8)}, \Psi_i^{(8)}), \quad \Psi_r^{(8)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\Psi^{(8)} + \Psi^{(8)*}), \quad \Psi_i^{(8)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\Psi^{(8)} - \Psi^{(8)*}), \quad (3.11)$$

из (2.4) получим (2.7).

Лагранжиан уравнения Дирака-Кэлера, записанного в вещественной форме, эквивалентен лагранжиану исходного уравнения (2.2) при выборе матрицы билинейной формы η в представлении (3.11) в виде

$$\eta = I_2 \otimes \sigma_3 \otimes \gamma_0 = -i\gamma_1\gamma_2 \otimes \gamma_0. \quad (3.12)$$

Уравнение (1.5) с волновой функцией (3.11), матрицами Γ_k (2.7) и лагранжианом (3.8), (3.12) будем называть вещественной формой исходного уравнения Дирака-Кэлера в пространстве 2+1. Эту форму мы и будем использовать при исследовании свойств внутренней симметрии уравнения Дирака-Кэлера в указанном пространстве.

Преобразования внутренней симметрии, оставляющие инвариантным данное уравнение и его лагранжиан, должны удовлетворять, во-первых, условиям (1.20), во-вторых, условию

$$Q^+ \eta Q = \eta, \quad (3.13)$$

а также сохранять структуру (3.11) волновой функции в том смысле, что если Ψ_N – вещественная (мнимая) компонента, то и $\Psi'_N(x_k) = Q_{NM} \Psi_M(x_k)$ также должна быть вещественной (мнимой).

Наиболее общий вид преобразования Q , удовлетворяющего условиям (1.20), проще всего определить в фермионном базисе, в котором матрицы Γ_k имеют структуру (2.11). Переход из базиса (3.11) в фермионный базис в данном случае можно осуществить посредством унитарного преобразования (2.12).

Условиям (1.20) удовлетворяют матрицы, имеющие в фермионном базисе вид (1.19), где $q^{(\alpha)}$ ($\alpha = 1 \div 4$) – произвольные комплексные матрицы 4×4 . Параметризуя матрицы $q^{(\alpha)}$ посредством базисных элементов e_N ($N = 1 \div 16$) в пространстве матриц 4×4 (2.14), получим 63-параметрическое преобразование, задаваемое базисными операторами (2.15).

Возвращаясь теперь обратно в представление (3.11), придем к выражениям (2.16) – (2.19) для операторов J^N, L^N, K^N, I^N .

Условие сохранения вещественного характера уравнения Дирака-Кэлера относительно матричных преобразований (1.18), задаваемых базисными операторами (2.16) – (2.19), накладывает на параметры ($\omega_N \rightarrow J^N, \theta_N \rightarrow L^N, \Lambda_N \rightarrow K^N, \Omega_N \rightarrow I^N$) ограничения (2.20).

Таким образом, преобразования внутренней симметрии уравнения Дирака-Кэлера в пространстве 2+1 описываются унитарной 63-параметрической группой, зада-



вамоў эрмітовскімі базіснымі операторамі (2.16) – (2.19), якім адпавядае 35 рэчаўных і 28 мнімых параметраў (2.20).

В далейшым будзем работата ў прадставленні

$$\Psi = (\psi^{(8)}, \bar{\psi}^{(8)}), \quad (3.14)$$

дзе $\bar{\psi}^{(8)} = \psi^{(8)+} \gamma_0$. Пераход ад прадставлення (1.5) в прадставленне (3.14) ажыццяўляецца с палюўжы унітарнага прабразавання (2.22).

В прадставленні (3.14) для генератараў (2.16) – (2.19) палучаем выражэння (2.23) – (2.26). Далее із ных і адпавядаючых ім параметраў (2.20) складзім матрыцы Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 канечных прабразаванняў унутранняй сіметрыі ураўнення Дірака–Кэлера. В рэзультаце палучым выражэння (2.28). Отсюда следуе, што прабразавання унутранняй сіметрыі расмаатрываемага ураўнення Дірака–Кэлера прымаюць від (2.29).

Условіе інварыянтнасці лагранжыана тэорыі накладывае на параметры прабразаванняў (2.29) абмежаванні

$$\begin{aligned} & |a_1|^2 - |a_3|^2 + |a_5|^2 - |a_7|^2 + |a_9|^2 - |a_{11}|^2 + |a_{13}|^2 - |a_{15}|^2 - \\ & - |b_1|^2 + |b_3|^2 - |b_5|^2 + |b_7|^2 - |b_9|^2 + |b_{11}|^2 - |b_{13}|^2 + |b_{15}|^2 = 1, \\ & |a_2|^2 - |a_4|^2 + |a_6|^2 - |a_8|^2 + |a_{10}|^2 - |a_{12}|^2 + |a_{14}|^2 - |a_{16}|^2 - \\ & - |b_2|^2 + |b_4|^2 - |b_6|^2 + |b_8|^2 - |b_{10}|^2 + |b_{12}|^2 - |b_{14}|^2 + |b_{16}|^2 = -1, \\ & a_1^* b_2 - a_3^* b_4 - a_2^* b_1 + a_4^* b_3 - a_5^* b_6 + a_7^* b_8 + a_6^* b_5 - a_8^* b_7 - \\ & - a_9^* b_{10} + a_{11}^* b_{12} + a_{10}^* b_9 - a_{12}^* b_{11} + a_{13}^* b_{14} - a_{15}^* b_{16} - a_{14}^* b_{13} + a_{16}^* b_{15} = 0, \\ & a_1^* a_2 - a_3^* a_4 - b_2^* b_1 + b_4^* b_3 + a_5^* a_6 - a_7^* a_8 - b_6^* b_5 + b_8^* b_7 + \\ & + a_9^* a_{10} - a_{11}^* a_{12} - b_{10}^* b_9 + b_{12}^* b_{11} + a_{13}^* a_{14} - a_{15}^* a_{16} - b_{14}^* b_{13} + b_{16}^* b_{15} = 0, \\ & -a_1^* a_5 + a_3^* a_7 + b_5^* b_1 - b_7^* b_3 + a_5^* a_1 - a_7^* a_3 - b_1^* b_5 + b_3^* b_7 - \\ & - a_9^* a_{13} + a_{11}^* a_{15} + b_{13}^* b_9 - b_{15}^* b_{11} + a_{13}^* a_9 - a_{15}^* a_{11} - b_9^* b_{13} + b_{11}^* b_{15} = 0, \\ & -a_1^* a_6 + a_3^* a_8 + b_6^* b_1 - b_8^* b_3 + a_5^* a_2 - a_7^* a_4 - b_2^* b_5 + b_4^* b_7 - \\ & - a_9^* a_{14} + a_{11}^* a_{16} + b_{14}^* b_9 - b_{16}^* b_{11} + a_{13}^* a_{10} - a_{15}^* a_{12} - b_{10}^* b_{13} + b_{12}^* b_{15} = 0, \\ & a_1^* b_6 - a_3^* b_8 - a_6^* b_1 + a_8^* b_3 + a_5^* b_2 - a_7^* b_4 - a_2^* b_5 + a_4^* b_7 - \\ & - a_9^* b_{14} + a_{11}^* b_{16} + a_{14}^* b_9 - a_{16}^* b_{11} + a_{13}^* b_{10} + a_{15}^* b_{12} - a_{10}^* b_{13} - a_{12}^* b_{15} = 0, \\ & -a_2^* a_6 + a_4^* a_8 + b_6^* b_2 - b_8^* b_4 + a_6^* a_2 - a_8^* a_4 - b_2^* b_6 + b_4^* b_8 - \\ & - a_{10}^* a_{14} + a_{12}^* a_{16} + b_{14}^* b_{10} - b_{16}^* b_{12} + a_{14}^* a_{10} - a_{16}^* a_{12} - b_{10}^* b_{14} + b_{12}^* b_{16} = 0, \\ & -a_1^* a_9 + a_3^* a_{11} - b_9^* b_1 + b_{11}^* b_3 + a_5^* a_{13} - a_7^* a_{15} + b_{13}^* b_5 - b_{15}^* b_7 - \\ & - a_9^* a_1 + a_{11}^* a_3 - b_1^* b_9 + b_3^* b_{11} + a_{13}^* a_5 - a_{15}^* a_7 + b_5^* b_{13} - b_7^* b_{15} = 0, \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} & -a_1^*a_{10} + a_3^*a_{12} - b_{10}^*b_1 + b_{12}^*b_3 + a_5^*a_{14} - a_7^*a_{16} + b_{14}^*b_5 - b_{16}^*b_7 - \\ & -a_9^*a_2 + a_{11}^*a_4 - b_2^*b_9 + b_4^*b_{11} + a_{13}^*a_6 - a_{15}^*a_8 + b_6^*b_{13} - b_8^*b_{15} = 0, \\ & a_1^*b_{10} - a_3^*b_{12} + a_{10}^*b_1 - a_{12}^*b_3 + a_5^*b_{14} - a_7^*b_{16} + a_{14}^*b_5 - a_{16}^*b_7 - \\ & -a_9^*b_2 + a_{11}^*b_4 - a_2^*b_9 + a_4^*b_{11} - a_{13}^*b_6 + a_{15}^*b_8 - a_6^*b_{13} + a_8^*b_{15} = 0, \\ & -a_2^*a_{10} + a_4^*a_{12} - b_{10}^*b_2 + b_{12}^*b_4 + a_6^*a_{14} - a_8^*a_{16} + b_{14}^*b_6 - b_{16}^*b_8 - \\ & -a_{10}^*a_2 + a_{12}^*a_4 - b_2^*b_{10} + b_4^*b_{12} + a_{14}^*a_6 - a_{16}^*a_8 + b_6^*b_{14} - b_8^*b_{16} = 0, \\ & -a_1^*a_{13} + a_3^*a_{15} - b_{13}^*b_1 + b_{15}^*b_3 - a_5^*a_9 + a_7^*a_{11} - b_9^*b_5 + b_{11}^*b_7 - \\ & -a_9^*a_5 + a_{11}^*a_7 - b_5^*b_9 + b_7^*b_{11} - a_{13}^*a_1 + a_{15}^*a_3 - b_1^*b_{13} + b_3^*b_{15} = 0, \\ & -a_1^*a_{14} + a_3^*a_{16} - b_{14}^*b_1 + b_{16}^*b_3 - a_5^*a_{10} + a_7^*a_{12} - b_{10}^*b_5 + b_{12}^*b_7 - \\ & -a_9^*a_6 + a_{11}^*a_8 - b_6^*b_9 + b_8^*b_{11} - a_{13}^*a_2 + a_{15}^*a_4 - b_2^*b_{13} + b_4^*b_{15} = 0, \\ & -a_1^*b_{14} + a_3^*b_{16} - a_{14}^*b_1 + a_{16}^*b_3 + a_5^*b_{10} - a_7^*b_{12} + a_{10}^*b_5 - a_{12}^*b_7 + \\ & + a_9^*b_6 - a_{11}^*b_8 + a_6^*b_9 - a_8^*b_{11} - a_{13}^*b_2 + a_{15}^*b_4 - a_2^*b_{13} + a_4^*b_{15} = 0, \\ & -a_2^*a_{14} + a_4^*a_{16} - b_{14}^*b_2 + b_{16}^*b_4 - a_6^*a_{10} + a_8^*a_{12} - b_{10}^*b_6 + b_{12}^*b_8 - \\ & -a_{10}^*a_6 + a_{12}^*a_8 - b_6^*b_{10} + b_8^*b_{12} - a_{14}^*a_2 + a_{16}^*a_4 - b_2^*b_{14} + b_4^*b_{16} = 0, \\ & -a_2^*b_{14} + a_4^*b_{16} - a_{14}^*b_2 + a_{16}^*b_4 + a_6^*b_{10} - a_8^*b_{12} + a_{10}^*b_6 - a_{12}^*b_8 = 0, \\ & -a_1^*b_{13} + a_3^*b_{15} - a_{13}^*b_1 + a_{15}^*b_3 + a_5^*b_9 - a_7^*b_{11} + a_9^*b_5 - a_{11}^*b_7 = 0, \end{aligned} \tag{3.15}$$

которые отличаются от (2.32) в силу различия в задании матрицы билинейной формы (2.31) и (3.12).

Таким образом, на 64 параметра преобразования (2.29) с учетом единичного накладывается 28 условий, в результате чего получается 36-параметрическая группа внутренней симметрии лагранжевой формулировки теории.

Для установления математической структуры данной группы перейдем к рассмотрению бесконечно малых однопараметрических преобразований, для которых условие инвариантности лагранжиана принимает вид (1.37) и (1.38).

Непосредственная проверка показывает, что эти условия выполняются для 36-ти однопараметрических преобразований, задаваемых генераторами

$$\begin{aligned} & J^2, J^4, J^5, J^6, J^8, J^9, J^{10}, J^{12}, J^{13}, J^{16}, \\ & L^2, L^4, L^5, L^6, L^8, L^9, L^{10}, L^{12}, L^{13}, L^{16}, \\ & K^2, K^4, K^5, K^6, K^8, K^9, K^{10}, K^{12}, K^{13}, K^{16}, \\ & I^1, I^3, I^7, I^{11}, I^{14}, I^{15}, \end{aligned} \tag{3.16}$$

которым соответствуют 20 вещественных $(\omega_2, \omega_5, \omega_8, \omega_{10}, \omega_{13}, \omega_{16}, \theta_2, \theta_5, \theta_8, \theta_{10}, \theta_{13}, \theta_{16}, \Lambda_2, \Lambda_5, \Lambda_8, \Lambda_{10}, \Lambda_{13}, \Lambda_{16}, \Omega_7, \Omega_{14})$ и 16 мнимых $(\omega_4, \omega_6, \omega_9, \omega_{12}, \theta_4, \theta_6,$



$\theta_9, \theta_{12}, \Lambda_4, \Lambda_6, \Lambda_9, \Lambda_{12}, \Omega_1, \Omega_3, \Omega_{11}, \Omega_{15}$) параметров. Указаныя преобразования абразуюць групу $SO(5,4)$.

Полную групу ўнутранняй сіметрыі масіўнага ўраўнення Дірака–Кэлера ў прастранстве $2+1$ можна атрымаць з вышэй ўстаноўленай групы сіметрыі шляхам выключэння преобразаванняў, звязаных з генератарамі K^N, I^N , якія антыкамутуюць з матрыцамі Γ_k . В выніку атрымаем 20-параметрычную неперывную групу преобразаванняў, задаваных генератарамі

$$\begin{aligned} J^2, J^4, J^5, J^6, J^8, J^9, J^{10}, J^{12}, J^{13}, J^{16}, \\ L^2, L^4, L^5, L^6, L^8, L^9, L^{10}, L^{12}, L^{13}, L^{16}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

с 12-цю рэальных ($\omega_2, \omega_5, \omega_8, \omega_{10}, \omega_{13}, \omega_{16}, \theta_2, \theta_5, \theta_8, \theta_{10}, \theta_{13}, \theta_{16}$) і 8-мью мнімымі ($\omega_4, \omega_6, \omega_9, \omega_{12}, \theta_4, \theta_6, \theta_9, \theta_{12}$) параметрамі. В силу сказанага раней такія ж сіметрыя мае месца ў прастранстве $2+1$ і для сістэмы двух безмасавых ўраўненняў Дірака (2.1) з лагранжыянам (3.10).

Такім чынам, як і ў звычайным чатырхмерным многаобразіі Мінкаўскага, ў прастранстве $2+1$ ўраўненне ДК можа выступаць ў якасці альтэрнатывы (лібо геаметрычнага аналага) ўраўненню Дірака. Новым жа момэнтам здысь яўляецца тое, што ў прастранстве $2+1$ ўраўненне Дірака–Кэлера саотвештае не чатырем, як ў прастранстве $3+1$, а двум ўраўненням Дірака, а дападатная ступень свабоды прымятальна к графену мае четкую фізічную інтэрпретацыю.

Заклученне

В настоящей работе исследованы свойства внутренней симметрии одного и системы двух уравнений Дирака, уравнения Дирака–Кэлера в пространстве размерности $2+1$.

Получены следующие результаты.

Наиболее полной группой непрерывных преобразований внутренней симметрии лагранжиана безмассового уравнения Дирака является 10-параметрическая унитарная группа, локально изоморфная группе $SO(3,2)$. При учете массы симметрия сужается до группы $SO(2,1) \otimes SO(2,1)$.

Внутренняя симметрия лагранжевой формулировки системы двух безмассовых уравнений Дирака в пространстве размерности $2+1$ описывается 36-параметрической унитарной группой, локально изоморфной группе $SO(5,4)$. В случае двух уравнений с ненулевой массой симметрия понижается до 20-параметрической группы $SO(3,2) \otimes SO(3,2)$.

Установленная симметрия существенно шире тех, что обычно обсуждаются в литературе по данному вопросу применительно к указанным уравнениям.

Преобразования внутренней симметрии уравнения Дирака–Кэлера в пространстве размерности $2+1$ совпадают с симметрией системы двух уравнений Дирака с лагранжыяном $L = L_1 - L_2$. Это означает, что уравнение Дірака–Кэлера можа служыць ў якасці мадэлі геаметрызаванага апісання діракаўскіх квазічастіц ў графене.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorbar, E.V. Magnetic field driven metal-insulator phase transition in planar systems / E.V. Gorbar [et all.] // arXiv: cond- mat/0202242v3. – 26 Aug, 2002.



2. Gusynin, V.P. AC Conductivity of grapheme : from tight-binding model to (2+1) – dimensional quantum electrodynamics / P.V. Gusynin // arXiv : 0706 3016v2. – 27 Nov, 2007.
3. Bashir, A. Fermions in odd space-time dimensions: back to basics / A. Bashir, Ma. De J.A. Galicia // arXiv: hep-ph/0502089v1 9 Feb 2005.
4. Novoselov, K.S. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / S.K. Novoselov [et all.] // Science 306, 666 (2004).
5. Стражев, В.И. Уравнение Дирака–Кэлера. Классическое поле / В.И. Стражев, И.А. Сатиков, Д.А. Ционенко. – Минск : БГУ. – 2007. – 196 с.
6. Плетюхов, В.А. Вещественное поле Дирака–Кэлера и дираковские частицы / В.А. Плетюхов, В.И. Стражев // Вестник БГУ. Серия 1. – 2009. – № 2. – С. 3–7.
7. Плетюхов, В.А. Внутренние симметрии безмассовых дираковских полей / В.А. Плетюхов, В.И. Стражев, П.П. Андруевич // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2011.– № 2. – С. 13–17.
8. Богуш, А.А. Введение в теорию классических полей / А.А. Богуш, Г.Л. Мороз. – Минск, 1968. – 368 с.

V.A. Pletyukhov, P.P. Andrusevich Internal symmetries of the Dirac and Dirac–Kähler fields

The internal symmetry of the Lagrangian Dirac and Dirac-Kähler fields is investigated. Method based on the reduction of the corresponding equations for the real form is used. It is shown that the symmetry group, which in this case are found, much wider symmetries, usually attributed to this fields.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 12.09.2013



УДК 691.544:666.941.2

Н.С. Ступень

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ, УСТОЙЧИВЫЕ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

В статье представлены данные по изучению влияния различных агрессивных сред на устойчивость композиционных вяжущих. Представлен обзор результатов исследований по оптимальному соотношению хлорид-ионов, сульфат-ионов и ионов водорода в добавках в бетонные композиции. Даны рекомендации по контролю и устранению возможных причин коррозионных процессов в цементном клинкере портландцемента и магнезиальных вяжущих, стальной арматуре.

В настоящее время вяжущие строительные материалы (портландцемент, магнезиальные, гипсовые вяжущие) не применяются в чистом виде. В связи с ростом промышленного и жилищного строительства потребность в получении строительных материалов, отвечающих современным требованиям, с каждым годом растет. В настоящее время бетоны практически всех составов разрабатываются и производятся с химическими или минерально-химическими добавками. Современные добавки позволяют существенно повысить качество бетона, уменьшить сроки схватывания, сэкономить материальные и энергетические ресурсы предприятий. Но при этом, зачастую теряется долговечность железобетонных конструкций. Это связано, прежде всего, с коррозионными процессами, которые идут в цементном камне и стальной арматуре.

В большинстве стран огромные расходы приходится на ремонтные работы, технический уход и восстановление существующих конструкций. Большая часть этих расходов вызвана проблемами, связанными с недостаточной прочностью и недолговечностью таких сооружений. Недолговечность и преждевременное окончание срока эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций инициируют не только технические и экономические проблемы, но также оказывают негативное влияние на окружающую среду и безопасность человека.

Известно, что долговечность железобетонных конструкций зависит не только от процессов, происходящих в цементном камне, но и от того, насколько бетонная композиция инертна по отношению к стальной арматуре. Стальная арматура становится активной и начинает корродировать, если изменяется реакция среды. Опытные данные показывают, что стальная арматура пассивна в щелочной среде. Для надежной защиты арматуры в бетоне необходимо, чтобы щелочность среды бетона была не ниже $pH = 11,8$. При меньших значениях pH возможна коррозия арматуры в бетоне. Сталь в щелочной среде пассивна. Наступление пассивности характеризуется резким облагораживанием электродного потенциала металла. Так железо в активном состоянии имеет потенциал 0,40 В, а в пассивном его потенциал поднимается до 1,0 В. Пассивность обеспечивается покрытием оксидных пленок: Fe_2O_3 или Fe_3O_4 .

В твердеющей бетонной смеси смещение потенциала стали в положительную сторону происходит не сразу. Значение потенциала стали зависит от влажности и от проницаемости бетона для кислорода. Начальное значение pH в бетонной смеси велико. Со временем оно изменяется вследствие химизма процессов твердения. Поэтому важен нижний диапазон значений pH , при котором коррозия стали не идет – 11,5 – 11,0 [1; 2].

Понижение pH среды в бетоне наблюдается при уменьшении концентрации $Ca(OH)_2$ вследствие выщелачивания его проточной водой или в случае использования



активных минеральных добавок. Вместе с тем в поверхностных слоях бетона может наблюдаться снижение щелочности вследствие нейтрализации гидроксида кальция кислотными жидкостями и газами (карбонизация). Активные минеральные добавки в составе портландцемента связывают гидроксид кальция, и концентрация извести в среде может снизиться настолько, что произойдет растворение гидроалюмината кальция. Гидроалюминат в этом случае будет образовываться в присутствии сульфат-ионов в жидкой фазе и его кристаллизация не вызовет разрушающих напряжений в цементном камне. Это может даже в какой-то степени способствовать уплотнению цементного камня.

Одним из основных факторов, определяющим скорость и степень коррозионных процессов строительных сооружений, является химический состав грунтовых вод.

Химический состав грунтовых вод зависит от многих факторов, и в том числе от состава пород и характера почв, с которыми соприкасается вода, состава питающих вод (атмосферных, речных, морских и т.д.), близости вод к поверхности и климатических условий данного района. В гидрогеологических исследованиях предложено несколько вариантов классификации состава подземных вод в зависимости от степени их минерализации. По предложениям К.Е. Питьевой, подземные воды можно разделить на четыре группы с различной степенью минерализации. Первая группа – пресные воды со степенью минерализации < 1 г/л. Это преимущественно гидрокарбонатные кальциево-магниево-натриевые воды. Вторая группа – слабоминерализованные воды $1 - 10$ г/л. Подземные воды этой группы включают гидрокарбонатный, сульфатный и хлоридный типы по анионам и кальциевый, магниевый и натриевый тип по катионам. В третью группу входят минерализованные воды со степенью минерализации $10 - 30$ г/л. Эти воды хлоридного типа по анионам и натриевого типа по катионам. Четвёртая группа включает воды со степенью минерализации более 30 г/л, они относятся к хлоридному типу по анионам и к натриевому, кальциевому, магниевому по катионам. Предельное содержание иона HCO_3^- зависит от того, с какими катионами связан сульфат ион. Содержание ионов HCO_3^- в грунтовых водах невелико. В пресных грунтовых водах при минерализации $5 - 6$ г/л может быть до $0,5 - 0,6$ г/л ионов HCO_3^- . В минерализованных грунтовых водах можно выделить как воды со значительным количеством ионов SO_4^{2-} , так и воды с очень малым содержанием этих ионов, но с большим количеством иона Cl^- , связанного с катионами Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ . В глубинных подземных водах в большом количестве присутствует CO_2 .

Оценить степень агрессивности вод можно только с учётом всего комплекса показателей, включающих химический состав грунтовых вод, назначение сооружений, особенности их конструкций, срок службы, применяемый цемент и требования, предъявляемые к бетону.

Наиболее распространёнными грунтовыми водами на территории стран СНГ являются сульфатные воды. Поэтому изучению процессов коррозии бетонов в сульфатных средах посвящено большое количество экспериментальных исследований. Установлено, что при действии на цементный камень растворов сульфатов в результате сложных физико-химических процессов изменяется фазовый состав цементного камня [1].

Теоретические предпосылки и экспериментальные данные показывают, что на стойкость бетона в сульфатных средах должны влиять другие компоненты, содержащиеся в природной среде, в частности хлорид и гидрокарбонат ионы. Хлориды являются распространённым компонентом поверхностных и грунтовых вод, а гидрокарбонаты кальция и магния обуславливают жесткость природных вод. Поэтому при исследовании



коррозионных процессов, происходящих в цементном камне в агрессивной среде, необходимо учитывать совместное влияние сульфат, хлорид и гидрокарбонат ионов.

Цементный камень – наиболее уязвимый компонент бетона к воздействиям внешней среды. Как известно, основной структурный компонент цементного камня – гидросиликаты кальция – выделяются из раствора в виде волокнистых субмикроскопических частиц. Вначале в свободном пространстве между частицами цемента гидросиликаты кальция образуются в виде длинных волокон. Затем по мере уплотнения структуры длина волокон уменьшается. Непрерывно растёт число контактов срастания кристаллов новообразований. С увеличением объёма твёрдой фазы при гидратации уменьшается общий объём и размеры пор. В результате этих процессов прочность цемента непрерывно нарастает [1; 2]. Под действием различных агрессивных сред в цементном камне начинаются деструкционные процессы, т.е. процессы коррозии.

Гидросиликаты кальция могут устойчиво существовать в твердой фазе в равновесии с жидкой средой, если концентрация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе выше определенного количества, называемого предельной концентрацией.

При концентрации гидроксида кальция в жидкой среде 1,2 г/л устойчивы все перечисленные выше минералы. При концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1,06 – 1,08 г/л высокоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты переходят в низкоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты. При концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0,16 – 0,36 г/л гидроалюминаты подвергаются полному гидролизу с образованием $\text{Al}(\text{OH})_3$. При более низких концентрациях оксида кальция однокальциевый силикат распадается с образованием геля кремниевой кислоты [1].

Весьма часто наблюдаются разрушения бетонных и железобетонных конструкций, соприкасающихся с грунтами, насыщенными или периодически увлажняемыми минерализованными водами, в частности содержащими хлорид-ионы.

Хлориды являются распространенным компонентом поверхностных и грунтовых вод. Хлорид-ионы сами по себе инертны по отношению к цементному клинкеру, так как не образуют труднорастворимых соединений с кальцием – главным элементом минералов цементного камня. В основном их агрессивность связывают только с коррозией стальной арматуры в железобетонных конструкциях. Однако при исследовании влияния жидких агрессивных сред на процессы изменения фазового состава цементного камня необходимо учитывать совместное влияние всех ионов.

Коррозия стальной арматуры в бетоне является основной проблемой, с которой сталкиваются исследователи сегодня при попытке поддерживать в работоспособном состоянии бетонные и железобетонные конструкции.

Существуют два основных фактора, которые вызывают коррозию арматуры в бетоне. Это карбонизация и присутствие хлорид-ионов, которые либо были составляющими бетона с самого начала, либо проникли в бетон из окружающей среды за время срока эксплуатации.

В литературе уровень пороговых значений содержания хлорид-ионов, не вызывающих коррозию стальной арматуры, обычно варьирует от 0,17 до 2 % по массе цемента [1].

Наиболее технически сложной и серьезной причиной повреждения и преждевременного разрушения железобетонных конструкций является неконтролируемое проникновение хлорид-ионов из окружающей среды.

Бетон обеспечивает высокий уровень безопасности стальной арматуры от коррозии вследствие высокой щелочности растворов, содержащихся в порах. При высокой



щелочности сталь находится в пассивированном состоянии. Кроме того, хорошо консолидированный и правильно выдержанный бетон с низким водоцементным отношением обладает низкой водопроницаемостью, что минимизирует проникновение факторов, вызывающих коррозию стальной арматуры, таких как хлорид-ион, углекислый газ, влага и т.д. Если бетон должным образом спроектирован, применен и обслужен, не должно возникать значительных проблем с коррозией стали во время срока эксплуатации конструкций.

Однако часто на практике не соблюдаются все требования по прочности и долговечности железобетонных конструкций. Высокая концентрация хлоридов в защитном слое бетона вызывает депассивацию стальной арматуры. Хлорид-ионы атакуют пассивный слой, но, в отличие от карбонизации, не происходит общего падения pH. Хлориды действуют как катализаторы для инициации коррозии, когда возникает достаточная концентрация их на поверхности арматуры. Кроме этого, причиной повышенной концентрации хлорид-ионов в цементном камне может быть применение добавок с примесями хлорида натрия или калия.

Риск коррозии арматуры связывается с уровнями содержания хлорид-иона как в некарбонизированном, так и в карбонизированном бетоне. Использование цементов с высоким содержанием C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) считается способствующим хорошей сопротивляемости коррозии из-за способности химически связывать хлориды при помощи образования хлороалюмината кальция, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$, называемого солью Фриделя [3].

Экспериментальным путем установлено, что низкие значения pH могут усилить действие на стальную арматуру агрессивных хлорид-ионов при их концентрациях ниже критических значений, установленных в EN 206-1. При концентрации хлорид-ионов выше 0,02% от массы цемента стальная арматура пассивна при pH бетонных смесей 12,0 – 13,0. Содержание сульфат-ионов в цементных композициях с концентрацией выше 12000 г/мл вызывает сульфатную коррозию в цементном камне (идет интенсивное выщелачивание) [4].

Для более детального анализа причин коррозии необходимо учитывать совокупность факторов, влияющих на понижении пассивности стальной арматуры. При пониженном значении pH более малые концентрации агрессивных по отношению к стали ионов могут вызывать ее коррозию.

Исследования процессов коррозии цементного клинкера и стальной арматуры в железобетонных конструкциях привели к получению множества композиционных цементных вяжущих с различными активными добавками, улучшающими свойства цементов и бетонов, повышающих их долговечность. К природным активным минеральным добавкам относят некоторые осадочные горные породы (диатомит, трепел, опоку, глиежи – естественно обожженные глинистые породы), а также породы вулканического происхождения (вулканический пепел, туф, пемзу, трасс). В качестве искусственных активных минеральных добавок используют побочные продукты и отходы промышленности: быстроохлажденные (гранулированные) доменные и электротермофосфористые шлаки, топливные золы и шлаки, нефелиновый шлам (побочный продукт производства глинозема, состоящий на 80% из двухкальциевого силиката), обожженные при температуре до 800°C глины (глиниты, цемянка) и др. В составе минеральных добавок в значительном количестве содержатся химически активные составляющие: аморфный водный диоксид кремния (диатомиты, трепелы и другие осадочные породы); аморфный диоксид кремния и алюмосиликаты (вулканические и искусственные добавки); мета-



каолинит и активный глинозем (в добавках, содержащих обожженное глинистое вещество – глины, глиежи, зола-унос и топливные шлаки). Если такие добавки тонко измельчить, то в присутствии влаги, даже при обычной температуре, они способны взаимодействовать с гидроксидом кальция, находящемся в извести или выделившимся при твердении портландцемента, образуя практически нерастворимые продукты реакции. Но не всегда применение активных добавок в цемент решает вопросы коррозии, особенно коррозии стальной арматуры.

Исследованиями установлено, что при действии на цементный камень растворов сульфатов в результате сложных физико-химических процессов изменяется фазовый состав цементного камня. Несомненно, характер образующихся соединений гидросульфатоалюмината кальция и гипса, а также скорость их образования зависят не только от концентрации сульфат-ионов, но и от вида и концентрации катионов и других анионов, находящихся в водной среде.

Ранее нами были установлены закономерности изменения фазового и минералогического состава в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ под действием сульфат ионов, а также под влиянием совместного действия сульфат и гидрокарбонат ионов. Установлено, что в присутствии гидрокарбонат-ионов в сульфатном растворе в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ заметно уменьшается содержание гидросульфатоалюмината кальция [4]. Совместное влияние хлорид и сульфат-ионов зависит от количественного соотношения между ними. Экспериментально установлено, что при концентрациях сульфат-ионов 3 и 5 г/л и при соотношении $\text{SO}_4^{2-} : \text{Cl}^- = 1:1$ степень выщелачивания гидроксида кальция в системе уменьшается [5; 6].

Практический интерес также представляют исследования влияния фосфатных добавок на степень и скорость сульфатной коррозии в цементном клинкере. Исследование фазового состава затвердевших образцов показало, что в структуре цементного клинкера с добавкой фосфата натрия присутствует крупнокристаллическая фаза ортофосфата кальция и мелкокристаллическая фаза гидрофосфата кальция. Данные рентгенофазового анализа подтверждаются исследованием шлифов образцов. Основную поверхность шлифа образцов с фосфатной добавкой составляют округлые зерна и их гроздевидные совокупности с четкими, а иногда размытыми границами. Зерна бесцветные, прозрачные показателем преломления 1,70 – 1,71. Более размытые зерна имеют показатель преломления 1,65 – 1,67. Оптические характеристики и внешний вид этих кристаллов соответствует фосфату и гидрофосфату кальция. Свободный (несвязанный) оксид кальция в образцах без добавки фосфата натрия содержится в цементном клинкере в количестве, обычно не превышающем 0,75 – 1%. Это свидетельствует о неполноте реакций образования силикатов кальция. Свободный оксид кальция в клинкере представлен в виде скоплений или отдельных округлых зерен, часто примерно одинакового с белитом размера; его трудно обнаружить в прозрачном шлифе клинкера, но он хорошо виден в полированном шлифе, так как благодаря округлой форме заметно выделяется на поверхности шлифа. Содержание свободного оксида кальция в образцах с добавкой фосфата натрия, исходя из соотношения концентраций ионов $\text{SO}_4^{2-} : \text{PO}_4^{3-} = 1:2$ уменьшается до 0,3%, а это влечет за собой уменьшение степени выщелачивания и стабилизации pH на высоком уровне (pH = 12).

Таким образом, при небольших концентрациях сульфат-ионов (до 5 г/л) в агрессивной среде введение фосфатов при соотношении $\text{SO}_4^{2-} : \text{PO}_4^{3-} = 1:1$ и $1:2$ уменьшает количество водорастворимых ионов кальция в системе. Положительное влияние фосфатов в значительной степени проявляется в стабилизации pH на уровне 11 – 12.



В присутствии фосфатов структура цементного клинкера уплотняется за счет образования крупнокристаллических новообразований фосфата кальция.

Современный строительный материал должен быть универсальным, обладать одновременно высокими конструктивными способностями и теплоизолирующими свойствами. Должен быть негорючим, долговечным, влагостойким, экологически чистым. Строительный материал также должен обладать достаточными декоративными свойствами, должен быть получен из минерального сырья и быть конкурентоспособным в сравнении с узкопрофильными материалами-аналагами. Именно таким требованиям отвечает магнезиальный цемент. Он быстро твердеет, отличается высокой прочностью, способностью связывать органические и неорганические заполнители. Вещества органического происхождения (опилки, стружки) длительное время не корродируют в среде магнезиальных вяжущих в отличие от портландцементных и известковых композиций.

Основным сырьем для получения магнезиальных вяжущих служит горная порода магнезит $MgCO_3$. Ограниченное распространение магнезита обуславливает более высокую себестоимость изделий по сравнению с изделиями из других вяжущих материалов.

Расширить производство магнезиального вяжущего можно путем получения его из более распространенного природного сырья. Сырьем для получения магнезиального цемента может служить природный доломит $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ [7].

Доломит – это осадочная порода, на 90% и более состоящая из минерала доломита. При содержании доломита 50 – 90% породу называют известковым доломитом, а при меньшем содержании доломита – доломитизированным известняком. Самой обычной примесью является кальцит, нередко ангидрит или гипс, иногда аутигенный кремнезем (кварц и кремнезем).

На территории Беларуси известно 15 месторождений с общими запасами 759,3 млн тонн. Наиболее крупные из них месторождения в коренном залегании: Руба (Витебский район), Кобеляки (Оршанский район), Сарьянка (Верхнедвинский район). Эти месторождения расположены в долинах рек Западной Двины, Днепра, Сарьянки, где и выходят на дневную поверхность. Наиболее обширные выходы наблюдаются по левобережью Западной Двины возле Витебска – месторождение Руба. Общие его запасы составляют 790 млн тонн. Залегают доломиты в виде пастообразной толщи под моренными и водно-ледниковыми четвертичными отложениями.

Одной из важных областей применения доломита является производство каустического доломита и изготовление из него магнезиального вяжущего.

Каустический доломит – продукт тонкого помола обожженного природного доломита при температуре 650 – 720°C. Полуобожженный доломит содержит в своем составе 20 – 28% активного оксида магния и инертное вещество в количестве 60 – 70% $CaCO_3$.

Доломит, обожженный при температуре выше 900°C можно затворять водой и применять для приготовления растворов для кладки и штукатурки.

Для приготовления вяжущего полуобжиговой доломит, как и каустический магнезит, затворяют растворами солей электролитов: $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $FeSO_4 \cdot 5H_2O$ и т.д.

Как известно, затворение магнезиальных вяжущих водой сопровождается сложными физико-химическими процессами. Оксид магния, растворимость которого в воде очень незначительна (0,001 г/л), образует насыщенный раствор. В растворе происходит взаимодействие оксида магния с водой, в результате которого образуется сначала гелеобразный, а затем кристаллический гидроксид магния $Mg(OH)_2$.



Растворимость оксида магния зависит от удельной поверхности, ориентации кристаллов, концентрации дефектов и температуры. В свою очередь, скорость растворения зависит от скорости диффузии растворенных молекул оксида магния через слой насыщенного раствора. Немаловажную роль в этом процессе играет рН среды. При низких значениях рН растворение оксида магния определяется поверхностной реакцией между протоном водорода и оксидом, а при увеличении водородного показателя процесс переходит в диффузионную область и определяется растворимостью магния в воде. При повышении температуры растворимость MgO в воде уменьшается, но скорость растворения увеличивается. Медленная гидратация объясняется тем, что оксид покрывается пленкой аморфного коллоидального гидроксида Mg(OH)₂.

Выявлена техническая возможность применения в качестве заполнителей для бетонов на каустическом доломите промышленных отходов (древесная мука, золошлаковые смеси, бумажные и пластиковые отходы, отходы переработки автомобильных шин) при частичном или полном замещении ими природного заполнителя – строительного песка.

Бетоны на каустическом доломите можно использовать для устройства двухслойных полов для обеспечения и повышения тепло- и звукоизоляции. Верхний слой должен обладать повышенной устойчивостью к действию воды, агрессивных сред и может быть изготовлен из композиционного доломитового цемента с добавками микрокремнезема, который обеспечит эти качества [8; 9].

Анализ результатов определения прочности бетонов, полученных на основе каустического доломита, измельченного по различным режимам, показывает, что для этого вяжущего увеличение дисперсности является эффективным средством повышения прочности бетона [8]. В частности, увеличение удельной поверхности каустического доломита с 1320 до 5500 см²/г обеспечивает существенный рост прочности бетона (более чем в 2 раза) во все сроки твердения. Дальнейшее увеличение тонкости помола в пределах до 8500 см²/г технически нецелесообразно, так как повышает прочностные характеристики всего на 10–15%, а энергетические затраты на помол не компенсируются. Растворимость оксида магния в значительной степени повышается в присутствии хлорид- и сульфат-ионов. При гидратации оксида магния в растворах солей хлоридов и сульфатов образуются преимущественно гелеобразные продукты и кристаллы игольчатой формы [8]. Скорость гидратации увеличивается, среди продуктов гидратации появляются оксохлориды или оксосульфаты магния (в зависимости от вида соли). Согласно литературным данным, состав образуемых оксохлоридов самый разнообразный, что зависит от водородного показателя среды, а также от концентрации применяемой соли: 3MgO·MgCl₂·11H₂O, 3MgO·MgCl₂·10H₂O, 3MgO·MgCl₂·6H₂O, 5MgO·MgCl₂·12H₂O, 5MgO·MgCl₂·14H₂O, 3MgO·MgCl₂·18H₂O [8; 9].

Но образование оксохлоридов в значительной степени понижает устойчивость таких систем, что отрицательно сказывается на качестве изделий из магниезальных вяжущих. Оксохлориды магния, составляющие основу продуктов гидратации оксида магния в присутствии хлорид-ионов, неустойчивы при действии воды и легко подвергаются гидролизу.

С целью регулирования строительно-технических свойств вяжущего на основе каустического доломита изучено влияние различных химических добавок на устойчивость бетонных смесей на его основе, а также на физико-механические свойства и долговечность бетонов (темпы твердения, прочность, собственные деформации, водостойкость, морозостойкость и водонепроницаемость, стойкость в агрессивных средах).



В качестве модификаторов могут быть использованы алюмофосфатная, фосфатная, боратная добавки и их сочетания. Добавки вводили на стадии помола полуобожженного доломита. Установлено, что при использовании комплексных фосфатно-боратных добавок существенно нормализуются процессы структурообразования и твердения бетонов на основе каустического доломита и улучшаются их свойства: достигается устойчивый рост прочности, снижаются собственные деформации расширения, уменьшается опасность развития деструктивных процессов (образование трещин) и т.д. Так, например, введение указанных добавок в количестве 1 – 3,2% массы каустического доломита в магнезиально-доломитовые бетонные смеси значительно повышает их долговечность. Механизм действия этих добавок как замедлителей схватывания связан, по-видимому, с осаждением и формированием фосфатно-боратных комплексов [8]. Мелкие частицы труднорастворимых добавок адсорбируются при помоле на частицах активного оксида магния, затрудняя доступ к ним затворителя. Затем в растворе образуются хелатные комплексы, влияющие на прочность и структуру цементного камня.

Еще одним из существенных недостатков магнезиальных вяжущих на доломитовом сырье является их низкая водостойкость и атмосферостойкость. Кроме этого, на поверхности доломитовых изделий могут появляться высолы хлорид-ионов. Такой недостаток существенным образом сужает область применения данного вяжущего.

Среди большого количества гидравлических добавок, влияющих на процессы твердения каустического доломита, обращают на себя внимание кремнесодержащие и фосфорсодержащие материалы. Действие их основывается на связывании легкорастворимых соединений магния и кальция в труднорастворимые гидросиликаты и фосфаты.

Присутствие аморфного кремнезема способствует увеличению скорости гидратации оксида магния. Скорость образования гидросиликатов при комнатной температуре в значительной степени зависит от дисперсности SiO_2 . Установлено, что если кварцевые частицы имеют размеры меньше 20 – 30 мк, то они довольно быстро взаимодействуют с гидроксидом магния, образуя гидросиликаты. Это, в частности, обусловлено тем, что скорость образования гидросиликатов при комнатной температуре увеличивается с повышением концентрации силановых групп ($-\text{Si}-\text{OH}$), которая в свою очередь связана с дисперсностью кварцевого порошка. При помоле кварца происходит частичное разрушение связи $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ с образованием связи $-\text{O}-\text{Si}-$, которая с влагой воздуха легко образует на поверхности зерен кварца силановые связи $-\text{Si}-\text{OH}$.

Гидросиликаты магния образуются первоначально в виде гелевидных пленок, которые значительно устойчивее пленок $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Эти выводы были получены путем измерения электропроводности жидкой фазы.

Практическое значение имеет введение в вышеуказанную систему активной мелкодисперсной модификации Al_2O_3 .

Было установлено, что данная система обладает вяжущими свойствами, т.е. со временем затвердевает. Сложность изучения такой системы обусловлена химическим взаимодействием между компонентами, сопровождающимся образованием гелевидной и субмикроструктурной фаз, характеризующихся малой скоростью перекристаллизации при комнатной температуре. Поэтому выявление фазового и минералогического состава четырехкомпонентной системы $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ в значительной степени носит предположительный характер.

Комплексным физико-химическим анализом установлено, что в системе $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ образуются кристаллический гидроксид магния, а также рентгеноам-



морфные образования гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроалюмосиликатов магния, кристаллизация которых при комнатной температуре происходит медленно [10].

Минералогический состав представлен в основном соединениями, близкими к серпентинам, гидроалюмосиликатам типа природного польгорскита.

Наличие аморфной фазы, а также присутствие труднорастворимых соединений способствует водостойкости вяжущих магнезиальных композиций.

Изучение кинетики структурообразования в системе $Mg(OH)_2-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ показало образование коллоидных систем. По истечении времени появляются признаки кристаллизационного структурообразования. Переход к жесткой кристаллической структуре вызывает развитие внутренних напряжений после формирования единого каркаса и термодинамической неустойчивости контактов срастания.

Исследования фазового и минералогического состава системы позволяют предположить, что при взаимодействии компонентов идет образование многочисленных соединений типа гидросиликатов и гидроалюминатов магния. Эти соединения характеризуются малой растворимостью в воде, что придает системе водостойкость, а это особенно важно для технологии производства композиционных строительных материалов на основе магнезиальных вяжущих, которые являются перспективным строительным материалом.

Процессы, происходящие при действии агрессивных сред (солевых систем) на композиционный магнезиальный цемент, представляют одновременно структурообразующие и деструктивные явления, т.е. разрушительному явлению может предшествовать период кольматаций пор. Отсюда следует, что состав новообразований и стабильность соединений зависит от состава агрессивного раствора.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что алюмосиликатная система магния $MgO-SiO_2-Al_2O_3-H_2O$ разрушается под действием сульфатной и гидрокарбонатной среды. В первую очередь, разрушения связаны с вымыванием растворимых компонентов, прежде всего сульфата магния, сульфата алюминия и, в некоторой степени, гидроксида магния.

Растворимость гидроксида магния в растворах сульфата натрия с повышением концентрации сульфат-иона увеличивается. Это связано с тем, что идет интенсивно коррозия третьего вида. Происходит нарушение структуры поверхностного слоя образцов и увеличение скорости диффузии гидроксида магния из более глубоких слоев к поверхности взаимодействия с агрессивным раствором. Жидкая фаза в данной системе представляет собой раствор гидроксида магния концентрации, близкой к концентрации насыщенного раствора, и содержит незначительные количества кремнезема и глинозема. Гидросиликаты магния могут устойчиво существовать в твердой фазе в равновесии с жидкой средой, если концентрация $Mg(OH)_2$ в жидкой фазе выше определенного количества, называемого предельной концентрацией. Рентгенофазовыми исследованиями установлено, что под действием сульфат-ионов в системе $MgO-SiO_2-Al_2O_3-H_2O$ образуются кристаллы высокосульфатной формы гидросульфалюмината магния, которые являются довольно стабильными и положительно влияют на устойчивость данной системы в агрессивных средах. Агрессивные среды, содержащие гидрокарбонат-ионы, также влияют на устойчивость системы $MgO-SiO_2-Al_2O_3-H_2O$.

Агрессивность среды проявляется, если исследуемая вода не находится в равновесии с карбонатом магния, который образовался на поверхности цементного камня за счет естественной карбонизации. Система стремится перейти в равновесное состояние, растворив определенное количество карбоната кальция и затратив для этого часть сво-



бодной угольной кислоты. Установлено, что в растворах гидрокарбоната натрия с концентрацией по гидрокарбонат иону от 0,7 до 5,6 мг-экв/л растворимость MgO уменьшается по сравнению с чистой водой при различном суммарном содержании оксида магния в системе. Дальнейшее увеличение концентрации карбонат иона до 11,2 мг-экв/л не оказывает существенного влияния на растворимость MgO.

Рентгенофазовый анализ подтверждает данные, полученные кинетическим методом.

Так как естественные агрессивные среды обычно содержат одновременно и сульфат и карбонат-ионы, поэтому практический интерес представляет изучение совместного действия ионов на изучаемую систему.

В сульфатно-гидрокарбонатных растворах влияние концентрации иона HCO_3^- на интенсивность процесса растворения гидроксида магния проявляется несколько иначе, чем в чистых гидрокарбонатных средах. Анализ экспериментальных данных показал, что концентрация гидрокарбонат-ионов 0,7 мг-экв/л снижает растворимость MgO по сравнению с растворимостью в чистом сульфатном растворе. Увеличение концентрации гидрокарбонат ионов в два раза практически не влияет на результаты исследований. При концентрации HCO_3^- 5,6 – 8,4 мг-экв/л растворимость оксида магния остается почти такой же, как в чистой воде. Дальнейшее увеличение концентрации гидрокарбонат-ионов приводит к резкому увеличению растворимости оксида магния, а значит, и к деструкции данного композиционного материала [11].

Таким образом, композиционные магнезиальные вяжущие, модифицированные гидравлическими добавками, позволяют получить ценный строительный материал, устойчивый в агрессивных средах. При твердении доломитового цемента с добавкой дисперсного SiO_2 образуются гидросиликаты магния типа серпентина $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и сепиолита $8\text{MgO} \cdot 12\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Образование этих минералов обеспечивает водостойкость таких композиционных вяжущих. Затвердевший модифицированный цемент на основе доломита обладает повышенной прочностью и водостойкостью при содержании SiO_2 10 – 20%. Кинетика вымывания гидроксида магния существенным образом зависит от содержания в природных водах гидрокарбонат ионов. Даже при значительных концентрациях сульфат ионов гидрокарбонат ионы уменьшают растворимость оксида магния. Но при концентрации гидрокарбонат-ионов более 11,2 мг-экв/л сульфатная коррозия идет очень интенсивно [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов, Ф.М. Коррозионностойкие бетоны и железобетонные конструкции / Ф.М. Иванов, Г.В. Любарская, Г.В. Чехний. – М. : Наука, 1981. – 253 с.
2. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.]. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.
3. Москвин, В.М. О роли ионного и солевого состава раствора при сульфатной коррозии бетона / В.М. Москвин, Г.В. Любарская // Бетон и железобетон. – 1982. – № 9. – С. 16–18.
4. Ступень, Н.С. Исследование системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ в присутствии ионов SO_4^{2-} и HCO_3^- / Н.С. Ступень, Б.С. Шевченко, Ю.В. Волынчук // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. прыродазнаўчых навук. – 2003. – № 2. – С. 55–61.
5. Ступень, Н.С. Влияние хлоридов на степень выщелачивания гидроксида кальция в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ в сульфатной агрессивной среде / Н.С. Сту-



пень, М.В. Лукашенко // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. – Сер. прыродазнаўчых навук. – 2008. – № 2. – С. 45–51.

6. Ступень, Н.С. Влияние хлорид-ионов на устойчивость фосфатных композиций в сульфатной среде / Н.С. Ступень // Прыроднае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. прац. / Рэдкал.: М.В. Міхальчук (адк. рэд.). – Брэст : Альтернатыва, 2012. – С. 264–266.

7. Ступень, Н.С. Совместное влияние фосфатных и силикатных добавок на устойчивость цементного клинкера в сульфатной среде / Н.С. Ступень // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2012. – № 2. – С. 5–9.

8. Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян. – М. : Наука, 1972.–215 с.

9. Каминская, А.Ю. Новое в технологии изготовления изделий с применением магнийсодержащих вяжущих / А.Ю. Каминская. – М. : Обзор, 1988. – 341 с.

10. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М. : Наука, 1981. – 256 с.

11. Ступень, Н.С. Действие агрессивных сред на коррозию магниезальных вяжущих / Н.С. Ступень // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2013. – № 1. – С. 5–12.

N.S. Stupen Composite Binders, Stability in Aggressive Environments

The article presents data on the effect of various aggressive environments on the stability of the composite binding. A review of research on an optimum ratio of chloride ions, sulfate ions and hydrogen ions in a concrete additive composition. The recommendations on the control and elimination of possible causes of corrosion processes in the cement clinker of Portland cement, magnesia binders, steel reinforcement.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 15.05.2013



УДК 581.524.4

В.И Бойко

ЛЕСНАЯ И КУСТАРНИКОВАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ РЕСПУБЛИКАНСКОГО ЗАКАЗНИКА «СРЕДНЯЯ ПРИПЯТЬ»

В статье дана подробная характеристика лесных и кустарниковых массивов заказника «Средняя Припять». Проведен формационно-типологический анализ лесов, даны их возрастные характеристики формаций и приведены составы древостоя. По разнообразию типов леса территорию заказника можно считать богатой. Они представлены широким спектром экосистем: от слабо увлажненных на сухих эоловых песчаных и свежих супесчаных почвах лесов вересковой, мшистой и орляковой серий до кисличных сосняков и снытевых дубрав, коренных черноольшаников на низинных болотах и богатых по составу флоры и фауны смешанных лесов. Всего на территории заказника насчитывается 82 типа леса 11 формаций.

Лесопокрытая площадь территории заказника «Средняя Припять» составляет 36122,7 гектара. Лес – главный ландшафто- и средообразующий, почвозащитный и водоохраный компонент территориального природно-растительного комплекса. Пойменные и припойменные леса играют важную средообразующую, почвозащитную и водоохранную роль в сохранении естественного состояния пойменной экосистемы главной водной артерии Полесья – р. Припять. Суходольные участки леса в пойме располагаются отдельными островками. Высокая степень расчлененности лесных массивов, наличие заболоченных и водных пространств усиливают мозаичность условий среды и уровень разнообразия экотопов на территории заказника. Отдельные участки в пределах границ заказника являются редкими по породному и флористическому составу, возрастной структуре и пространственному строению, наличию редких и охраняемых видов растений, занесенных в Красную Книгу Республики Беларусь, совокупности элементов биотопического разнообразия, что придает им особую значимость в сохранении и поддержании биоразнообразия лесной территории Полесья.

Своеобразие лесов заказника «Средняя Припять» определяют, прежде всего, пойменные, большей частью чистые дубравы, флористически и фаунистически богатые плакорные дубравы, коренные черноольшаники, мелколиственные березовые и смешанные ольхово-березовые леса с их богатым бетулярным флористическим комплексом, относительно бедные сосняки и ивняковые заросли, иногда с примесью дуба.

На части лесных земель заказника насаждения не достигли стадии смыкания лесного полога. Это земли потенциальные для формирования смешанных, богатых по биотическому и биологическому разнообразию сообществ. Биотопическое разнообразие большинства таких участков очень низкое. Вместе с тем некоторые участки этой категории необходимы для обитания животных, птиц или растений, требующих в процессе естественной динамики открытых пространств и хорошей освещенности.

Особый интерес представляют собой прогалины. К прогалинам относятся личные земли: крупные поляны, заброшенные сенокосы, участки с отдельно стоящими вековыми деревьями дуба. Большой частью прогалины оставлены под естественное зарастание, реже засажены лесными культурами.

Большое количество стариц, пойменных озер чередуется с сухими грядами, трудно проходимыми и заболоченными кустарниками и тростниковыми зарослями. Озера, как правило, сильно заросшие погруженной и полупогруженной водной расти-



тельностью, среди которой встречаются *Сальвиния плавающая* *Salvinia natans* и другие охраняемые виды.

Формационно-типологический анализ лесов

Почвенно-орографические и климатические условия поймы Припяти благоприятны для формирования и развития разнообразной лесной растительности, и прежде всего для требовательных к условиям почвенной среды широколиственных лесов. В связи с тем, что лесные массивы заказника расположены вдоль реки Припять в зоне с повышенной плотностью населения, они подвергаются повышенному антропогенному прессу, хотя и расположены большей частью в водоохранной зоне реки Припять. Тем не менее, здесь сохранились значительные участки прежде широко распространенных пойменных дубрав, а также высоковозрастных коренных субклимаксовых черноольшаников.

Формация сосновых лесов. Сосновые леса занимают в заказнике 4878,6 га (13,5% лесопокрытой территории). Наибольшую площадь сосновые леса занимают в Ольшанском лесничестве Полесского лесхоза Столинского района – 3396 га, что составляет 69,65% сосняков заказника. Сосновые фитоценозы приурочены преимущественно к песчаным, реже супесчаным почвам. Фитоценозы сосняков характеризуются следующими средними таксационными показателями: возраст 23–70 лет, бонитет I–II, реже III.

Сосновые леса представлены 13 типами леса (таблица 1).

Таблица 1 – Типы сосновых лесов заказника «Средняя Припять»

Тип леса	Занимаемая площадь, га	% от площади формации
Сосняк багульниковый	350,7	7,2
Сосняк вересковый	97,5	2,0
Сосняк длинномошный	568,5	11,6
Сосняк лишайниковый	12,2	2,75
Сосняк мшистый	1241,9	24,5
Сосняк осоковый	145,2	3,0
Сосняк осоково-сфагновый	913,1	17,3
Сосняк черничный	1175,2	24,0
Сосняк орляковый	283	5,8
Сосняк кисличный	78	1,6
Сосняк брусничный	0,9	0,02
Сосняк снытевый	5,8	0,12
Сосняк приручейно-травяной	6,6	0,14

Сосняк мшистый занимает слегка повышенные, ровные или волнистые местоположения. Избирает дерново-подзолистые, песчаные почвы. Состав древостоя: 8–10с, редко Б(б)Д. Бонитет древостоя достаточно высокий (I–II). Возраст деревьев 40–70 лет.

Сосняк вересковый. Почвы дерново-подзолистые, песчаные, несколько суховатые. Состав древостоя: 10с, бонитет II (реже III).

Сосняк орляковый. Приурочен к повышенным местоположениям и верхним частям склонов, но с более богатыми дерново-подзолистыми, супесчаными почвами,



чем сосняк мшистый. Состав древостоя 7СЗБ(б). Бонитет сосны высокий, достигает I класса. Возраст растений 55 лет.

Сосняк черничный приурочен обычно к пониженным местоположениям с кочковатым нанорельефом. Преобладают дерново-подзолистые, оглеенные, гумусированно-песчаные, иногда супесчаные, влажные почвы. Состав древостоя: 5–1Ос до 4Ол(ч)Б(б)ДГ. Бонитет сосны достигает I класса с тенденцией падения до II. Снижение бонитета объясняется повышением увлажнения почвы, которая весной и осенью становится даже сырой. Возраст 55–66 лет.

Сосняк лишайниковый. Занимает небольшие участки на вершинах всхолмлений и дюн, покрывает слаборазвитые, дерново-подзолистые, сухие, бедно песчаные почвы. Состав древостоя: 1Ос, редко Б (б). Бонитет древостоя очень низкий (IV–V).

Сосняк брусничный. Распространен незначительно. Занимает повышенные или ровные местоположения, чаще примыкает к вересковому типу с незаметными переходами. Покрывает дерново-подзолистые, свежие, песчаные почвы. Состав древостоя: 8–1Ос до 2Б(б)ЕОс; бонитет несколько выше, чем в сосняке вересковом (II–III).

Сосняк кисличный. Распространен незначительно. По почвенно-грунтовым условиям, составу пород, подлеска и покрова – это самый богатый тип сосняков, который может быть как коренным, так и производным от дубовых и еловых лесов. Сосняк кисличный располагается на плато, нижних частях склонов и пологих подножий. Почвы свежие, дерново-подзолистые, легкосуглинистые, а также песчаные и супесчаные, подостланные суглинком. Состав древостоя еще сложнее, чем в сосняке орляковом, нередко двухъярусный. В первом ярусе 6–1Ос до 4ЕДБ(б)ЛпОс, во втором – дуб, ель, граб. Относится к наиболее продуктивным соснякам. Их бонитет исключительно высокий (1а–I классов).

Сосняк приручейно-травяной. Встречается редко вблизи ручьев или рек, иногда возле низинных болот. Площади этого типа незначительны, и в связи с мелиорацией идет их дальнейшее сокращение. Сосняк приручейно-травяной играет водоохранную и водорегулирующую роль, его необходимо сохранять (не подлежит осушению). Почвы перегнойно-глеевые, торфянисто-глеевые, подстилаемые породами разного механического состава (песок, супесь), очень сырые, проточные. Состав древостоя (6–1Ос до 4 Ол(ч) Б(б) Б(п) Е Ос) хорошо отражает болотные условия местопроизрастания наличием ольхи черной и березы пушистой. Бонитет сосны колеблется от II до III класса, на прирусловых участках иногда приближается к I.

Сосняк долгомошный. Занимает небольшие участки, но встречается относительно часто на понижениях возле болот (ниже черничника) с выраженным нанорельефом. Для него характерны торфянисто-подзолисто-глеевые почвы, песчаные или супесчаные, сырые, среднепроточные, требующие мелкой мелиорации. Состав древостоя (8–1Ос до 2 Е Б(б) Б(п) Ол(ч) Д) нередко сформирован чистой сосной. Основной бонитет III, в более проточных условиях на влажных почвах – II класса.

Сосняк багульниковый. Размещается на окраинах сфагновых болот и в отдельных впадинах среди долгомошников, занимает торфяно-глеевые слабопроточные почвы верхового заболачивания. Древостой монодоминантные, но встречаются с примесью березы пушистой, реже ели (8–1Ос до 2Б(п) Е). Бонитет IV–V классов. Требуются мелиоративные мероприятия.

Сосняк осоковый. Формируется на низинных болотах с торфяно-болотными слабопроточными почвами. Чаще встречаются древостой со значительной примесью березы пушистой (бидоминантная формация), реже ольхи черной и ели (7–1Ос до 3Б(п)



Ол(ч) Е). Бонитет сосны низкий (IV–V классы), продуктивность может быть повышена путем мелиорации. В сосняк осоковый входят березово-осоковая, елово-осоковая, ольхово-осоковая, ивняково-осоковая, тростниково-осоковая и багульниково-осоковая ассоциации.

Сосняк осоково-сфагновый. Характерен для типичных переходных болот, почвы торфяно-болотные со слабопроточными и даже застойными водами. В составе древостоя господствует сосна, удерживается береза пушистая, иногда ель, уходит ольха черная. Примерный состав: 7–1Ос до 3Б(п)Е. Бонитет очень низкий (Va–V классы).

Формация дубовых лесов (дубрав). Дубовые леса составляют 6129,5 га (16,78%) лесопокрытой площади заказника. Они представлены 15 типами лесов (таблица 2). Наибольшую площадь дубравы занимают в Микашевичском лесничестве Лунинецкого района – 1748 га (28%), а также значительную в Лясковичском и Люденевичском лесничествах Житковичского района, что составляет соответственно 931,7 га (15,25%) и 827,1 га (13,5%).

Таблица 2 – Типы дубрав заказника «Средняя Припять»

Тип леса	Занимаемая площадь, га	% от площади формации
Дубняк злаково-пойменный	287,1	4,7
Дубняк ольхово-пойменный	529,6	8,6
Дубняк прируслово-пойменный	1325,9	21,7
Дубняк снытевый	276,6	4,5
Дубняк кисличный	726,7	11,9
Дубняк крапивный	40,7	0,6
Дубняк луговиковый	42,5	0,7
Дубняк папоротниковый	900,5	14,7
Дубняк пойменный	774,3	12,6
Дубняк широколиственно-мшистый	12,2	0,2
Дубняк широколиственно-пойменный	247,3	4,0
Дубняк осоково-травяной	2,3	0,04
Дубняк осоковый	0,5	0,01
Дубняк орляковый	337,6	5,6
Дубняк черничный	625,7	10,2

Дубняк черничный приурочен к ровным или слабоповышенным местам, занимает дерново-подзолистые супесчаные, оглеенные почвы с прослойками суглинка или глины, что ведет к образованию верховодки и застаиванию воды. Повышенное увлажнение способствует расселению черники (*Vaccinium myrtillus*). Бонитет дуба II класса, большая влажность почвы сказывается на продуктивности насаждений. Состав древостоя сложный (иногда двухъярусный): 4Д до 3ГЗБСОс.

Дубняк кисличный. Для его экотопов характерны ровные местоположения (плато) или незначительные склоны с богатыми, свежими дерново-подзолистыми супесчаными или суглинистыми почвами. Бонитет дуба I класса. Древостой чаще 3ДЗГСОс2Б(б), возраст растений достигает 45 лет.

Дубняк снытевый – относительно распространенный тип леса (28,2% от дубняков заказника). Фитоценозы формируются на понижениях и у подножий склонов, непосредственно примыкают к дубняку кисличному с малозаметными переходами. Почвы



богатые, влажные, дерново-подзолистые, оглеенные. Дубняки этого коренного типа высокобонитетные (I класса), здесь в древостое более обильно представлены граб, сосна и ольха черная. Примерный состав: 4Д2Г1С1Ол(ч). Возраст растений 55-60 лет.

Дубняк папоротниковый (кочедыжниковый) избирает понижения, склоны и ровные участки возле ольсов. Преобладают почвы дерново-подзолисто-глеевые, перегнойно-глеевые, сырые супесчаные или суглинистые со среднепроточным режимом увлажнения. В связи с развитием процесса заболачивания бонитет насаждений значительно ниже (II-III), чем в вышеуказанных типах дубняков. В древостое большая примесь ольхи черной, являющейся вторым эдификатором фитоценозов, менее представлены ясень и другие широколиственные породы. Состав древостоя: 3-6Д до 3Ол(ч)ЯСБГ, второй ярус развит слабо.

Дубняк орляковый. Значительно распространенный тип, занимающий повышенные, несколько всхолмленные местоположения. В отличие от других типов дубрав произрастает на относительно бедных дерново-подзолистых супесчаных, реже легких суглинистых, часто суховатых почвах. Бонитет дуба низкий (III-IV), в состав древостоя, как правило, входит сосна (6-10Д до 4СБ(б)ОсГЕ).

Дубняк крапивный. Малораспространенный тип леса, занимает пониженные, но хорошо дренированные местоположения, часто приурочен к склонам, примыкающим к черноольшаникам. Почвы очень богатые, перегнойно-глеевые, перегнойно-карбонатные оглеенные супесчаные, подстилаемые суглинком, или суглинистые, сырые. Дубняк крапивный – высокопродуктивный тип, преобладают насаждения I бонитета, реже II. В древостое часто большая примесь ясеня. Насаждения с ясенем в этих условиях представляют собою коренные кондоминантные дубово-ясеновые леса. Состав древостоя весьма сложный: 7-10Д до 3ЯЕОл(ч)ВИлЛпКОСБ(б)Б(п); второй ярус в зависимости от подзоны представлен грабом и елью, менее выражен, чем в дубняке снытевом.

Дубняк луговиковый (злаковый). Встречается сравнительно редко, по лощинам и блюдцам, среди кисличных и снытевых дубрав, где весной, а иногда и осенью застаивается вода. Почвы дерново-подзолисто-глеевые, супесчаные или суглинистые, сырые. Климатически замещающие варианты не выражены. В древостое преобладает дуб с примесью мелколиственных пород (ольха черная, береза пушистая), иногда ель. Состав: 8-10Д до 2 Ол(ч)Б(б)Б(п)Е. Бонитет насаждений II-III классов.

Дубняк прируслово-пойменный. Расположен на повышенной прирусловой части поймы. Почвы дерново-подзолистые, аллювиальные, иловато-песчаные, слабо-развитые, внизу часто оглеенные, проточные. Древостой монодоминантные, иногда с примесью ольхи черной и осины (9-10Д до 1Ол(ч)Ос), в большинстве редкостойные. Бонитет дуба низкий (III-IV).

Дубняк злаково-пойменный. Насаждения данного типа формируются на несколько повышенной части центральной поймы. Почвы аллювиальные, многочленные. Преобладают дерново-подзолистые, песчаные или супесчаные почвы, подстилаемые песком рыхлым, внизу оглеенные, с высокой проточностью грунтовых вод. Бонитет III, реже II класса. Состав древостоя: 9-10Д до 1Б(б)Б(п)Ол(ч)Ос.

Дубняк ольхово-пойменный. Заселяет пониженные участки центральной поймы, старицы рек с несколько застойными водами. Почвы дерново-подзолисто-глеевые и торфянисто-глеевые аллювиальные супесчаные. Преобладает III, а в более проточных местах отмечен II класс бонитета. В качестве второго эдификатора выступает ольха черная, иногда примешивается ясень. Состав древостоя: 7-10Д до 3 Ол(ч)ЯБ(п)Ос.



Дубняк шырокатравно-пойменны. Занимает наиболее удаленные участки от русел рек, т. е. конечную часть поймы, редко затопляемую. Почвы почти не отличаются от вышеописанного типа (дерново-подзолисто-глеевые супесчаные и суглинистые, влажные). Преобладает II бонитет, иногда он приближается к I классу. Состав древостоя: 9–10Д до 1ГБ(п)Б(б)Ол(ч)Кл.

Формация бородавчатоберезовых лесов. Бородавчатоберезовые леса являются интразональной формацией. Они формируются в результате смены коренных формаций сосновых и дубовых лесов.

Формация бородавчатоберезовых лесов, образовавшаяся в результате антропогенных воздействий, занимает 4070,2 га – 11,3% общей лесопокрытой площади. Наибольшая их площадь отмечается в Лунинецком лесничестве – 1090 га (26,7%). Бонитеты березняков в зависимости от почвенно-грунтовых условий колеблются от I до III класса. Наиболее высокая продуктивность отмечается у березняков, производных от еловых и дубовых лесов.

На более богатых перегнойно-глеевых и торфянисто-глеевых увлажненных почвах в состав древостоя в различных соотношениях входит и береза пушистая. Преобладание того или другого вида березы часто зависит от положения (вырубаемых насаждений по отношению к очагам обсеменения). Типы березовых лесов приведены в таблице 3).

Таблица 3 – Типы березовых лесов заказника «Средняя Припять»

Тип леса	Занимаемая площадь, га	% от площади формации
Березняк долгомошный	300,9	7,4
Березняк кисличный	314,4	7,7
Березняк крапивный	104,5	2,6
Березняк мшистый	36,2	0,9
Березняк орляковый	299,4	7,4
Березняк осаковый	273,6	6,7
Березняк осоково-травяной	1004,1	24,73
Березняк папоротниковый	1025,5	25,4
Березнякпр-пойменный	9,3	0,2
Березнякпр-черничный	633	15,0
Березняк снытевый	35,7	0,9
Березняк осоково-сфагновый	27,4	0,67
Березняк приручейно-травяной	15,8	0,4

Березняк черничный. Довольно распространенный тип леса (15% от березняков заказника). Местоположение пониженное с выраженной кочковатостью. Почвы влажные, дерново-подзолисто-глеевые песчаные с прослойками супеси, иногда супесчаные, подстилаемые песками и супесями. Бонитет березы бородавчатой I–II. Состав древостоев: 6–10Б(б) до 5 Ол(ч)4СДОсГ; нередко имеется примесь березы пушистой.

Березняк долгомошный размещается узкими полосами на понижениях возле болот с выраженной кочковатостью. Занимает площадь 300,9 га (7,4% от всех березняков). Почвы торфянисто-подзолисто-глеевые песчаные, реже супесчаные, сырые, со



слабопроточной увлажненностью. Бонитет насаждений II, в составе древостоев 6Б(б)Б(п) до 3ОсОл(ч).

Березняк крапивный. Насаждения данного типа формируются на понижениях и склонах, примыкающих к черноольшаникам. Распространен незначительно. Почвы весьма плодородные, перегнойно-глеевые супесчаные, сырые, но с хорошо проточным режимом увлажнения. Бонитет березы I класса. Состав древостоя кондоминантный: 8Б(б)1Д1Ол(ч).

Березняк папоротниковый (кочедыжниковый) распространен сравнительно широко (1025,5 га – 25,4% березняков заказника). Насаждения приурочены к понижениям и нижним частям склонов. Эдафически сопряжен с березняком крапивным, граничащим с черноольшаниками. Почвы очень богатые, но сырые со средне проточным увлажнением, перегнойно-подзолисто-глеевые, перегнойно-глеевые супесчано-суглинистые. Бонитет березы II класса. Состав древостоя: 5-10Б(б) до 5Ол(ч)ГДОсС.

Березняк мшистый. Распространен значительно шире, чем березняки вересковый и брусничный. Занимает повышенные местоположения. Рельеф ровный или слабо-волнистый. Почвы дерново-подзолистые песчаные, часто с прослойками супеси, свежие. Бонитет березы II–I классов. Состав древостоев: 6–10Б(б) до 4СОсЕ. Здесь во II ярусе начинает встречаться ель. Так же, как и в березняке брусничном, сильно развит нижний ярус из зеленых мхов.

Березняк орляковый. Его фитоценозы формируются на пологих повышениях и на верхних частях склонов. Рельеф слабоволнистый. Почвы дерново-подзолистые супесчаные, нередко с прослойками суглинка, свежие, иногда несколько суховатые. Преобладают древостой I бонитета, реже встречается II класс. Состав древостоя: 8–10Б(б) до 2СДЕОсГ.

Березняк кисличный. Встречается небольшими участками на плато, часто на пологих склонах. Почвы дерново-подзолистые, многочленные, по механическому составу чаще супеси или связные пески, подстилаемые суглинками, свежие. Этот тип березняка является производным от суборей (елово-сосновых, дубово-сосновых лесов) и характеризуется высоким бонитетом березы (1а–1б). Здесь сосна восстанавливается плохо, лучше идет смена пород на ель. Состав древостоев сложный (7–10Б(б) до ЗДСЕГЛп); увеличивается примесь дуба. Во втором ярусе появляются ель, граб, иногда береза пушистая.

Березняк приручейно-травяной. Распространен незначительно, возле ручьев, рек и водотоков. Почвы сырые, со среднепроточным увлажнением, иловато-глеевые, иногда торфянисто-глеевые, подстилаемые песком. Бонитет березы II–III классов. Состав древостоя: 6–10Б(б)Б(п) до 4СОл(ч)Е.

Березняк снытевый. Приурочен к пониженным местоположениям и подножиям склонов. Встречается довольно часто, хотя площади занимает небольшие (0,9%). Почвы влажные, хорошо аэрированные, дерново-подзолисто-глеевые супесчаные или суглинистые, подстилаемые суглинком. Древостой березы, сменившие дубняки или ельники, наивысших бонитетов (1а–1б). Состав сложный, многопородный: 7–10Б(б) до ЗДЕКлЯЛпОл(ч). Реже встречаются монодоминантные насаждения. Преобладает береза бородавчатая.

Березняк осоково-травяной. Произрастает на низинных болотах, возле ручьев и рек с торфянисто-глеевыми почвами. Торф высокой степени разложения (60–70%). Грунтовые воды проточные. Бонитет древостоев II класса, в более обводненных местах



несколько снижается. В древостоях большая примесь ольхи черной. Средний состав насаждений: 5–8Б(п) до 5Ол(ч)Б(б).

Березняк осоковый. Наиболее распространенный коренной тип березняка (50,7%), на сильнообводненном низинном болоте, примыкающем к переходному. Почвы торфяно-болотные со средней степенью разложения торфа (30–45%) и слабопроточным режимом увлажнения. Бонитет березы пушистой низкий (IV–V). Древостой с небольшой примесью ольхи черной, иногда ели, сосны и березы бородавчатой, чаще монодоминатные. Состав: 9–10Б(п) до 1Ол(ч)ЕС.

Березняк осоково-сфагновый. Сравнительно распространенный тип пушисто-березовых лесов. Выделен на переходном, сильнообводненном болоте. Почвы торфяно-болотные с низкой степенью разложения торфа (20–30%), с весьма слабопроточным или застойным увлажнением. Березняк осоково-сфагновый – коренной тип очень низкой производительности (Va–V бонитеты). Береза пушистая находится в самых экстремальных условиях своего существования. В древостоях часто примешивается сосна, реже – ель, ольха черная, ивы. Состав: 7–10Б(п) до 3СЕОл(ч)Ив.

Формация черноольховых лесов. Черноольховые леса занимают 11859,5 га (33%) лесопокрытой площади заказника. Наибольшей площадью и характеризуется Дубойское лесничество Лунинецкого района – 6205 га (52%). Коренные черноольховые леса (ольсы) расположены главным образом на низинных болотах. Формация представлена 7 типами леса (таблица 4).

Таблица 4 – Типы ольховых лесов заказника «Средняя Припять»

Тип леса	Занимаемая площадь, га	% от площади формации
Черноольшаник таволговый	2794,7	23,6
Черноольшаник снытевый	44,9	0,4
Черноольшаник папоротниковый	901,4	7,6
Черноольшаник осоковый	7197,6	60,7
Черноольшаник крапивный	617,7	5,2
Черноольшаник кисличный	45,2	0,4
Черноольшаник ивовый	258	2,9

Черноольшаник кочедыжниковый (папоротниковый) представлен в основном коренными ассоциациями. Занимает около 7,6% площади черноольшаников заказника. Расположен на понижениях, в ложбинах со слаборазработанными руслами рек, ручьев. Почвы торфянисто-перегнойно-глеевые маломощные, торфяно-болотные, среднеобводненные с признаками застойного увлажнения. Преобладают насаждения II бонитета. В древостоях часто примешивается дуб и ясень. Средний состав: 7–10 Ол(ч) до 2ДЯ.

Черноольшаник таволговый имеет довольно широкое распространение 23,6% площади формации. Это центральный коренной тип черноольховых лесов, занимающий плоские или с незначительным уклоном понижения и западинные участки поймы рек со слабовыраженной проточностью. Почвы торфянисто- и торфяно-болотно-глеевые, а также торфяно-болотные со средней и малой мощностью торфа, избыточно увлажненные. В этих экотопах ольха черная характеризуется высокой фитоценотической устойчивостью. Преобладают насаждения II бонитета. Происхождение ольхи смешанное, т. е. в равной мере представлены популяции как семенной, так и поросле-



вой регенерации. В составе древостоев, которые часто сформированы только ольхой, в примеси встречаются береза пушистая, дуб (8–10Ол(ч) до 2ДБЯ).

Черноольшаник осоковый – один из наиболее распространенных типов черноольховых лесов. Заселяет ровные, пониженные участки, сильнообводненные, но со слабопроточным увлажнением. Это коренной тип черноольшаника, при усилении застойности вод ольха черная постепенно выпадает и замещается березой пушистой. Фитоценозы формируются на торфяно- и торфянисто-глеевых почвах; встречаются торфяно-болотные малой и средней мощности, реже – перегнойно-торфянисто-глеевые почвы. Древостой ольхи черной в основном II бонитета, по составу как чистые, так и бидоминантные, с примесью березы пушистой (6–10 Ол(ч) до 4Б(п)ИЯ).

Наличие постоянных и временных водотоков внутри или на границе лесных участков, заболоченность территории, наличие таких элементов, как выраженная кочковатость, образующаяся вследствие естественного осушительного влияния ольхи черной, наличие валежа листовенных пород, концентрация видов эвтрофно-болотного флористического комплекса, объясняет повышенный уровень биоразнообразия черноольховых сообществ. Они выполняют водоохранную функцию в отношении водотоков и болот заказника. Наличие заболоченности, приуроченность к постоянным водотокам вне зависимости от возраста обеспечивают стабильный уровень биоразнообразия данных сообществ.

Черноольшаник кисличный. Имеет небольшое распространение. Для древостоев данного типа характерны следующие местоположения: подножия, нижние пологие части склонов, незначительные повышения среди низинных болот. Они произрастают на дерново-подзолистых, перегнойно-подзолисто-глеевых, перегнойно-глеевых супесчано-суглинистых, влажных и сырых, но хорошо дренированных почвах. Ольха черная почти повсюду семенного происхождения. Богатые условия местопроизрастания отражаются высоким бонитетом насаждений (I–1a). Состав древостоев кондоминантный: (6–10Ол(ч) до 4ДБ(б)Б(п)ЕОсГ). Монодоминантные черноольшаники встречаются редко. Восстановление дубрав в производных типах растягивается на несколько поколений. Выделены и описаны следующие важнейшие ассоциации: елово-кочедыжниково-кисличная, дубово-кочедыжниково-кисличная, лещиново-кисличная, крапивно-кисличная, снытево-кисличная, кочедыжниково-кисличная.

Черноольшаник снытевый. Менее распространен, чем черноольшаник кисличный. Расположен на ровных и относительно пониженных местах, более увлажненных, чем в предыдущем типе леса. Насаждения формируются на перегнойно-подзолисто-глеевых, перегнойно-торфянисто-глеевых, сырых и мокрых, но с хорошей проточностью почвах. Представлен производными от дубрав и ельников и коренными черноольшаниками (с ясенем и дубом). Черная ольха главным образом семенного происхождения, характеризуется высокими показателями роста (I–1a бонитеты). Состав древостоев чаще сложный, со значительной примесью широколиственных пород (дуб, ясень, ильм), в среднем следующий: 6–10Ол(ч) до 4ДЯЕБ(п)Б(б)ОсГ.

Черноольшаник крапивный. Распространен более широко, чем кисличный и снытевый черноольшаники. Произрастает преимущественно вблизи ручьев, канав с врезанными руслами и на хорошо дренированных склонах. Почвы представлены наиболее богатыми разностями, торфянисто-глеевые и перегнойно-подзолисто-глеевые, глубокогумусированные супеси и суглинки, среднеобводненные, сильнопроточные. В этих условиях ольха черная образует как коренные (на торфянисто- и торфяно-глеевых почвах), так и производные типы леса от ясеневых-дубовых и ясеневых-еловых фитоценозов



(на «перегноино-подзолисто-глеевых почвах). Древостой с преобладанием порослевой ольхи черной кондоминантные, реже монодоминантные. Примерный состав: 6–10Ол(ч) до 4ЯДБ(п)Б(б)ЕОс ЛпКлИлГ. Бонитет ольхи черной и ясеня очень высокий (1а–I).

Черноольшаник ивняковый (разнотравный). Занимает незначительные площади. Приурочен к западинам пересеченного рельефа, а также к ровным участкам на заболоченных водоразделах с высокой обводненностью почв. Часто примыкает к открытым осоковым болотам. Является коренным типом черноольховых лесов, занимает торфянисто- и торфяно-глеевые почвы (с различной мощностью торфа), слабоминерализованные, с длительно застойными водами. Это крайний тип в экологическом ряду ольсов с нарастающим застойным увлажнением, обуславливающим самую низкую продуктивность фитоценозов (III–IV бонитеты). В насаждениях большая примесь березы пушистой, меньше ели. Состав древостоев (в обобщенном виде): 5–10Ол(ч) до 5Б(п)Е. В пологе часто вычленяются два яруса. Ольха в основном порослевого происхождения.

Формация осиновых лесов.

Осиновые леса встречаются довольно редко (208,8 га – 0,6 % территории заказника) и представлены производными типами от ельников и дубрав, реже от сосняков. Больше их количество приходится на Люденевичское лесничество Житковичского района – 110,3 га (52,8%). Типы осинников приведены в таблице 5.

Осинник мшистый. Является производным от ельников и сосняков. Занимает слегка повышенные, ровные или волнистые местоположения. Почвы дерново-подзолистые, в основном супесчаные, от свежих до влажных; в производных осинниках от сосняков – песчаные или супесчаные, а от ельников – супесчаные, подстилаемые суглинком. Наиболее распространены насаждения II бонитета, хотя он может колебаться от I до III класса. В составе древостоя: 6–10Ос до 4Б(б)ЕДС, а в производном осиннике от сосняка – до 4СБ(б)ЕД.

Таблица 5 – Типы осиновых лесов заказника «Средняя Припять»

Тип леса	Занимаемая площадь, га	% от площади формации
Осинник мшистый	1,7	0,8
Осинник кисличный	98,9	47,3
Осинник орляковый	7,6	3,6
Осинник папоротниковый	22,3	10,7
Осинник снытевый	42	20
Осинник долгомошный	11,2	5,4
Осинник крапивный	2,3	1,2
Осинник приручейно-травяной	8,9	4,3
Осинник черничный	13,9	6,7

Осинник орляковый. Данный тип осиновых лесов чаще всего выступает как производный от сосново-дубовых лесов. Распространен сравнительно мало. Занимает повышенное местоположение и верхние части пологих склонов. Приурочен к дерново-подзолистым свежим почвам – от супесчаных до песчаных с прослойками супеси, подстилаемых суглинками. Бонитет древостоев в основном I–II, а в насаждениях, производных от дубрав и ельников, он повышается до 1а класса. Состав древостоев: 6–10Ос



до 4СДЕБ(б)Г; иногда примесь сосны падает, увеличивается участие в древостоях дуба, ели или березы бородавчатой. К числу выделенных и наиболее распространенных ассоциаций относятся сосново-орляковая, дубняково-орляковая, березово-орляковая, елово-орляковая, майниково-орляковая, мшисто-орляковая. Отмечена ассоциация и с грабовым вторым ярусом (грабово-орляковая).

Осинник кисличный. Весьма распространенный тип леса (52,0%), производный чаще всего от ельников и дубрав, занимающий плато, нижние части пологих склонов и их широкие подножия. Почвенно-грунтовые условия такие же, как и в коренных типах леса. Почвы свежие, дерново-подзолистые супеси и суглинки, часто подстилаемые тяжелыми суглинками и глиной. Бонитет осины очень высокий, в основном 1а, реже – I класса. Состав древостоя сложный: 8–10Ос до 2ЕДБ(б)ЛпГ, а в менее богатых условиях местопроизрастания – до 3СБ(б)ЕДГ.

Осинник снытевый. Данный тип осиновых лесов является производным, главным образом от ельников и частично от дубрав. В эдафическом ряду располагается ниже осинника кисличного, в понижениях и у подножий склонов с хорошо дренированными эдафотопами. Почвы дерново-подзолистые суглинистые, гумусированные, часто оглеенные, влажные. Бонитет осины высокий (1а–I). Состав древостоев чаще кондоминантный: 7–10Ос до 3ЕДОл(ч)Б(б)ГЛп. Здесь уже имеется значительная примесь ели (елово-снытевая ассоциация), появляются ольха черная (ольхово-снытевая ассоциация) и береза пушистая (березово-снытевая ассоциация).

Осинник крапивный. Является в основном производным от ельников и дубрав. Расположен на хорошо проточных понижениях и склонах, на стыках с черноольшаниками. Почвы обладают высоким плодородием, перегнойно-глеевые, нередко перегнойно-карбонатные супесчаные, иногда суглинистые, оглеенные, подстилаемые суглинками, сырые. Бонитет насаждений высокий (I–1а), но уже в связи с повышенной обводненностью несколько ниже, чем в кисличном и снытевом типах леса. Состав древостоя: 6–10Ос до 4Б(б)Б(п)ЕЯДОл(ч)Г.

Осинник папоротниковый (кочедыжниковый) сменяет ельники и дубравы папоротниковые. Выделен на понижениях и окраинах низинных болот. Преобладают перегнойно-глеевые супесчаные, иногда суглинистые, сырые, со среднепроточным увлажнением почвы. Насаждения преимущественно представлены I бонитетом. В более проточных местах (ассоциации снытево-папоротниковая и крапивно-папоротниковая) бонитет повышается до 1а класса. В составе древостоев: 7–10Ос до 3ЕДОл(ч)Б(б)Б(п).

Осинник приручейно-травяной встречается на окраинах низинных болот, а также вблизи ручьев и речек. Фитоценозы в основном производные от ельников и черноольшаников, реже от сосняков. Почвы торфянисто-глеевые, сильнообводненные, среднепроточные. Древостой осины II бонитета, в менее обводненных местах несколько выше (I класс). Состав насаждений: 6–10Ос до 4Б(б)Б(п) Ол (ч)ЕЯ.

Осинник черничный. Распространенный тип осинников, чаще производный от ельников, реже от дубрав и сосняков. Занимает слегка пониженные местоположения или незначительные склоны (обычно кочковатые). Для него весьма характерны дерново-подзолисто-глеевые супесчаные, иногда суглинистые, влажные почвы. Преобладает I бонитет, в осинниках, производных от сосняков – II. В древостоях в примеси береза бородавчатая, реже пушистая, ель, дуб, граб. Состав фитоценозов: 8–10Ос до 2Б(б)ЕДГСБ(п).

Осинник долгомошный. Сравнительно малораспространенный тип осиновых лесов, производный от сосняков и ельников, расположен на понижениях с сильно вы-



раженным нанорельефом. Преобладают торфянисто-подзолисто-глеевые, сырые, со средне- и слабопроточным увлажнением почвы. По механическому составу – супеси и пески, подстилаемые чаще суглинками, иногда песками и даже глиной. Бонитет насаждений II–III классов. Состав древостоев: 6–10Ос до 4СБ(б)Б(п). В осиннике, производном от ельников, представлена елово-долгомошная, а от сосняков – сосново-долгомошная ассоциация.

Формация грабовых лесов. Грабовые леса на территории заказника занимают 220,6 га (0,61% лесопокрытой площади). Наибольшую территорию грабняки покрывают в Дубойском лесничестве, что составляет 157,7 га (71,7%). Они представлены преимущественно кондоминантными фитоценозами. Типы грабовых лесов приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Типы грабовых лесов заказника «Средняя Припять»

Тип леса	Занимаемая площадь, га	% от площади формации
Грабняк кисличный	63,9	28,9
Грабняк черничный	1,6	0,7
Грабняк крапивный	43,2	19,6
Грабняк снытевый	111,9	50,8

Грабняк черничный. Фитоценозы формируются на повышенно ровных местах или широко пологих склонах. Почвы влажные, дерново-подзолистые, оглеенные, супесчаные, с прослойками суглинка. Бонитет граба низкий (II–III). Увеличивается примесь дуба, ели. Состав древостоя: 4Г1С4Б1Ол(ч).

Грабняк кисличный произрастает на дерново-подзолистых супесчаных свежих почвах. Отмеченные условия местообитания самые благоприятные (оптимальные) для развития граба и формирования фитоценозов, что выражается и в повышении его бонитета (II). В примеси дуб ольха черная, довольно часто встречаются сосна, осина и береза бородавчатая. В среднем состав древостоя следующий: 4Г2Д до 4ОсБ(б)Ол(ч).

Грабняк снытевый. Его фитоценозы, в основном производные от снытевых дубрав, формируются преимущественно на плоских понижениях и в нижних частях незначительных склонов (ниже грабняков кисличных). Занимает дерново-подзолистые (оглеенные) супесчаные или суглинистые, влажные почвы. Бонитет грабовых насаждений II класса. В составе фитоценозов значительная примесь дуба, березы, осины, ольхи черной (4Г2ДЗБОл(ч), 4Г2ДЗОл(ч)1Ос). Возраст деревьев 45–50 лет.

Грабняк крапивный. Малораспространенный тип грабняков (2,1 %), занимающий понижения (вблизи ольсов) и сырые, но хорошо дренированные местоположения. Почвы богатые, перегнойно-карбонатные (оглеенные) супесчаные или суглинистые. В связи с увеличением увлажнения отмечается снижение бонитета (III–II) по сравнению с грабняком кисличным. Состав древостоя сложный (610Г до 4ДОл(ч)ЕБ(б)Б(п)ОсЯЛпКл). Второй ярус представлен 7–10Г до 3ДЕКлЛп.

Формация еловых лесов. Еловые леса на территории заказника занимают площадь 171 га (0,47% лесопокрытой территории), представлены 4 типами леса (таблица 7). Ельники отмечаются только в Лясковичском лесничестве Житковичского района.



Таблица 7 – Типы еловых лесов заказника «Средняя Припять»

Тип леса	Занимаемая площадь, га	% от площади формации
Ельник кисличный	61,1	35,7
Ельник орляковый	27,1	15,8
Ельник снытевый	3,9	2,3
Ельник черничный	78,9	46,2

Ельник орляковый. Фитоценозы этого типа выделены на повышениях и верхних частях склонов (небольшими участками) на дерново-подзолистых супесчаных почвах, подстилаемых суглинком, иногда глиной, более суховатых, чем в ельнике мшистом. В древостое значительная примесь сосны и дуба, появляется граб. Состав сложный (6–10Е до 4СДБ(б)ОсГ). Ввиду особенностей экологических условий в этом типе, как и в ельнике брусничном, ель обладает пониженной фитоценотической устойчивостью и может сменяться сосной, березой, иногда и дубом. Бонитет еловых насаждений I, на более повышенных местах – II.

Ельник кисличный. Основной, коренной, тип ельников, имеет наиболее широкое распространение (35,7%). Располагается на плато, нижних частях склонов и их пологих подножиях. Почвы отличаются большим богатством, дерново-подзолистые супесчаные или пылевато-суглинистые, нередко подстилаемые глиной, гумусированные, свежие. Состав древостоев ельника кисличного сложный, часто с примесью широколиственных и мелколиственных пород. Его можно представить в следующем обобщенном виде: 7–10Е до 3ОсСДол(ч)Б(б)КЛпГ. Иногда формируются и монодоминантные древостой. Бонитет ели высокий (I–1а).

Ельник снытевый. Малораспространенный тип леса. Насаждения формируются в богатых условиях местопрорастания, на понижениях и подножиях склонов. Почвы преимущественно дерново-подзолистые, оглеенные, гумусированные, суглинистые или глинистые, влажные. Древостой чаще кондоминантные с большой примесью широколиственных пород, а также ольхи черной и березы бородавчатой, реже пушистой. Состав древостоя может быть выражен следующей обобщенной формулой: 7–10Е до 3ДЯОл(ч)ОсГЛпКБ(б). Продуктивность насаждений очень высокая. Преобладает 1а бонитет, иногда он снижается до I. В Полесье этот тип ельника замещается дубравой снытевой.

Ельник черничный. Довольно распространенный тип еловых лесов (46,2%), занимающий ровные пониженные местоположения с кочковатым нанорельефом. Почвы дерново-подзолистые (сильно оподзоленные), супесчаные или суглинистые, оглеенные, подстланые чаще суглинком, влажные, иногда с признаками избыточного увлажнения. Бонитет ели в основном II класса, в местах, примыкающих к ельнику кисличному, бонитет повышается (до I класса). Древостой ельника черничного в основном монодоминантные, отмечается примесь до 20% сосны. Состав: 8–10Е до 2СОсДБ(б).

Формация кленовых лесов.

Клен является постоянным компонентом дубовых и еловых лесов. Однако чистые кленовые леса занимают очень малую площадь (0,045% лесопокрытой территории заказника). Клен образует интразональные фитоценозы, в основном производные от дубрав, реже от ельников. Эдафотопы такие же, как и у коренных типов леса. Выделено два типа кленовников: снытевый 12,7 га (77,4%) и крапивный 3,7 га (22,6%).



В кленовниках снытевых и крапивных насаждения I–Ia бонитетов. По составу пород кленовники бывают как кондоминантные, так и монодоминантные (6–10Кл до 4ДЕЛпЯГВИлБ(б)Ос). В примеси чаще встречаются дуб, ель, граб, а также мелколиственные породы (береза, ольха черная, осина).

Формация ясеневых лесов. Ясеневые леса занимают всего лишь 155,7 га – 0,43% лесопокрытой площади заказника. Наибольшая их площадь характерна для Дубойского лесничества – 105 га (67%). Ясенники расположены узкой полосой между дубравами и ольсами. Занимают переходные места от дерново-подзолистых или бурых лесных почв к низинным болотам. Выделено 5 типов ясеневых лесов (таблица 8).

Таблица 8 – Типы ясеневых лесов заказника «Средняя Припять»

Тип леса	Занимаемая площадь, га	% от площади формации
Ясенник таволговый	37,3	23,9
Ясенник кисличный	6,0	3,8
Ясенник снытевый	68,3	43,9
Ясенник крапивный	41,7	26,9
Ясенник папоротниковый	2,4	1,5

Ясенник снытевый составляет 43,9% от ясенников заказника. Занимает хорошо дренированные нижние части склонов и их подножия. Почвы дерново-подзолисто-глеевые, с высоким содержанием гумуса, влажные, супесчаные, подстилаемые суглинком (иногда глиной). Преобладают насаждения I бонитета, иногда встречаются древостой II класса (пролесково-снытевая ассоциация). Древостой кондоминантные, часто многоярусные. К ясеню примешиваются ель, ольха черная, граб и другие породы. Состав насаждений: 4–7Я до 6ЕОл(ч)Б(б)Г.

Ясенник таволговый (23,9% от ясенников заказника) приурочен к понижениям возле ольсов. Почвы перегнойно-глеевые, перегнойно-торфянисто-глеевые, сырые, со средним проточным режимом увлажнения. Возраст насаждения 75 лет. Бонитет I класса. Состав древостоя: 10Я.

Ясенник кисличный. Имеет незначительное распространение на ровных плато или пологих склонах, покрытых дерново-подзолистыми, перегнойно-подзолисто-глеевыми супесчаными или суглинистыми, свежими почвами. Степень насыщенности почв основаниями высокая. Преобладают насаждения II бонитета, иногда бонитет увеличивается до I класса. Состав древостоя сложный, в большинстве двухъярусный, в примеси обычны ель, дуб, клен, ольха черная и другие породы (5–9Я до 5Е ДКлБ(б)Ол(ч)В).

Ясенник крапивный. Располагается на понижениях возле черноольшаников, вблизи ручьев и рек или временно действующих водотоков. Почвы очень богатые, перегнойно-карбонатно-глеевые, супесчаные, подстилаемые суглинком, или глубоко-суглинистые, сырые, с хорошей аэрацией. В экологическом отношении это самые оптимальные условия местопроизрастания ясеня, что отражается в наиболее высоком по сравнению с другими типами ясенников бонитете (Ia–I). Состав древостоя сложный, многопородный: 5–9Я до 5ДОл(ч) ОсГБ(б)Б(п)ЕКлЛпВ. Здесь устойчивыми компонентами являются дуб и ольха черная, редко встречаются чистые ясенники.

Кустарники (ивняковые заросли) распространены практически по всей территории заказника. Ивовые заросли вкраплены отдельными массивами в луговые фитоцено-



зы, или встречаются в виде небольших пятен практически по всей рассматриваемой территории. Это в основном сообщества с участием *Salix triandra*, *S. cinerea*, *S. aurita*, *S. pentandra*, *S. alba*, *S. fragilis*, *S. purpurea*, *S. myrsinifolia*, *S. rosmarinifolia*. (ИВД (ос-742,6 га; ив-743,4 га; кис-5,8 га; пап-137,5 га), а ИВК (ос-6098,3 га; ив-2,7 га; пап-50 га; тав- 2,2 га; сн-1,9 га; пм-638 га). Наибольшая площадь ИВК – 2850 га (41,9%), а ИВД – 751,6 га (46%) – приходится на Дворецкое лесничество Лунинецкого района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подготовка обоснования о преобразовании республиканских заказников «Простырь» и «Средняя Припять» : отчет о НИР (заключ.) ; рук. И.В. Абрамова. – Брест, 2010. – 314 с.

V.I. Boiko Forest and Scrub Vegetation of the National Reserve «Middle Pripyat»

The article gives a detailed description of forest and bush arrays of the reserve «Middle Pripyat». The author makes the formational and typological analysis of forests, gives their age characteristics of the formations and shows the compositions of the stand. The variety of forest types shows that the territory of the reserve is rich. The reserve has a wide range of ecosystems, from slightly moist to dry eolian sand and sandy loam soils, forests fresh heather, moss series to oxalidosum pine and oak forests, indigenous black alder forests in lowland swamps and rich in flora and fauna composition of mixed forests. The total number of various types of forest is 82 types of 11 formations.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 11.06.2013



УДК 597.6(476)

В.Е. Гайдук, Е.С. Блоцкая, И.В. Абрамова

РАСПРОСТРАНЕНИЕ, БИОТОПИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, СУТОЧНЫЕ И СЕЗОННЫЕ БИОРИТМЫ ЗЕМНОВОДНЫХ (AMPHIBIA) В ЮГО-ЗАПАДНОЙ БЕЛАРУСИ

В статье изложены результаты многолетних исследований (1967–2012 гг.) распространения, биотопического распределения, численности, суточных и сезонных биоритмов земноводных. Анализируется современное состояние амфибий в регионе и их охрана. В юго-западной Беларуси обитает 13 видов земноводных: *Triturus vulgaris* L., *T. cristatus* Laur., *Bombina bombina* L., *Pelobates fuscus* Laur., *Bufo bufo* L., *B. viridis* Laur., *B. calamita* Laur., *Hyla arborea* L., *Rana ridibunda* Pall., *R. lessonae* Camer., *R. esculenta* L., *R. terrestris* Nils., *R. temporaria* L. Населяют различные биотопы.

Введение

Биология земноводных в Брестской области до середины XX века была слабо изучена. В большей мере внимание к изучению этой группы животных было уделено в Беловежской пуще [1; 2]. Позже, в конце XX века земноводных здесь изучал В.А. Бахарев [3–5]. По данным этих авторов в Беловежской пуще встречается 12 видов земноводных. Некоторые сведения по земноводным Брестской области имеются в работе авторов этой статьи [6]. Общая характеристика степени изученности и состояние батрахофауны на конец XX века дана в монографии М.М. Пикулика [7] и в энциклопедическом справочнике [8], в которых имеются данные о местах находок земноводных Брестской области. Сведения фрагментарны по большинству видов региона, за исключением остромордой лягушки. Следует отметить работы коллектива авторов [9], которые изучали влияние осушительной мелиорации на состояние всего комплекса земноводных в районе р. Ясельда в Пружанском районе, а также состояние фауны амфибий в прируслово-пойменной зоне р. Припять на разных участках ее течения [10] и особенности формирования герпетокомплексов на осушительных системах польдерного типа в пойме р. Припять [11].

В последние десятилетия XX и в начале XXI века появилось ряд работ по ландшафтной батрахофауне и по биологии отдельных видов [12–14]. В работах С.М. Дробенкова [15–17] были рассмотрены вопросы структурной организации герпетокомплексов Белорусского Полесья, а также количественный состав и численность ассоциаций земноводных и пресмыкающихся в биоценозах Беларуси. Состояние фауны амфибий в естественных и мелиорированных пойменных зонах рек Беларуси, в том числе рек юго-западной Беларуси, изучал А.В. Хондогий [18]. Исследования О.В. Янчуревич [19] посвящены репродуктивной биологии и структуре популяций земноводных в урбанизированном ландшафте.

Материал и методы

Видовой состав амфибий, распределение их по экосистемам и численность (кроме сеголеток) изучали в марте – ноябре в 1967–2012 гг. в различных районах Брестской области: Брестском, Ганцевичском, Ивацевичском, Каменецком, Кобринском, Малоритском, Пинском, Столинском и др. Географические координаты крайних точек области 51° 30'–53° 24' с. ш. и 23° 11'–27° 37' в. д. Основной материал по различным



параметрам биологии земноводных был собран на стационарах. Суточные ритмы (дневная, сумеречная и ночная активность) и годовые биоритмы (сроки размножения, уход на зимовку и выход из нее) изучали в г. Бресте и его окрестностях, на дачном поселке «Леснянка» и в пойме р. Лесная Брестского района; в д. Любищицы и ее окрестностях Ивацевичского района, в лесах Ивацевичского лесхоза в 1972–2012 гг. и на базах полевых практик Брестского госуниверситета. Одна из таких баз находится в д. Орхово Брестского района. Здесь проводили исследования в мае – августе 1983–2012 годов в долине р. Западный Буг, включая водохранилище Орхово и два лесных пруда; в Томашовском, Домачевском, Меднянском лесничествах Брестского лесхоза и прилегающих агроценозах. Некоторые материалы по биологии земноводных были получены в НП «Беловежская пуца» в 1967–1981 гг., в Кобринском районе в окр. д. Пески в 1996–1998 гг., в Малоритском районе в окрестностях д. Великорита в 1977–1978 гг. Видовой состав, биотопическое распределение и численность земноводных в водоемах, прибрежных и других экосистемах изучали в различных районах Брестской области во время экспедиций, однократных и многократных выездов в заказники республиканского значения «Средняя Припять», «Споровский», «Званец», «Выгонощанский»; в рыбхозы и на водохранилища «Селец», «Локтыши», «Соколово», «Страдоч», «Новоселки»; на озера Селяхи, Ореховское, Олтушское, Выгоновское, Завищанское и др.

При изучении биологии земноводных использовали метод лентичных маршрутов (трансект) и пробных площадок размером 100x (2–4) м². Длина ленты равнялась 400–500 м и ширина 1–3 м и более в зависимости от количества учетчиков и густоты травяного покрова [7]. Учеты осуществлялись группами по 3–5, иногда 6–14 человек и проводились в период наибольшей суточной активности отдельных видов амфибий (днем, некоторых видов в сумерках или ночью). Общая продолжительность учетных маршрутов составляла около 240 км, общая площадь пробных площадок – 38 га. Полученные данные по маршрутным учетам и площадкам одного биотопа суммировались с последующим расчетом средней плотности на 1га. Учет водных видов проводился относительно длины береговой линии и 10 м² площади водоемов. Исследования проводились в условиях изменения климата в сторону потепления.

Амфибии региона освоили различные экосистемы. В период исследования нами изучались экологические особенности биотопов, климатические и температурные условия, биология амфибий. В работе сделан краткий анализ результатов исследования земноводных Брестской области.

Активное участие в сборах материалов принимали многие поколения (1967–2012 гг.) студентов и выпускников биологического и географического факультетов БрГУ, выполнявшие под руководством авторов этого исследования индивидуальные, курсовые и дипломные работы или сообщившие ценные сведения о земноводных региона, за что мы выражаем им искреннюю признательность.

Результаты исследования и их обсуждение

Земноводные юго-западной Беларуси до недавнего времени оставались одним из слабо изученных классов позвоночных животных. По нашим сведениям и литературным данным, фауна амфибий региона состоит из 13 видов. В недалеком прошлом считали, что в Беларуси обитает 12 видов земноводных [8]. В последние годы гибридная форма съедобная лягушка (*Rana esculenta* L.) выделена в самостоятельный вид. Таким образом, батрахофауна в Брестской области представлена 13 видами, которые относятся к отрядам Хвостатые *Caudata* (2 вида) и Бесхвостые *Anura* (11 видов) (таблица 1).



В Беловежской пуце прослежено изменение структуры батрахофауны в процессе сукцессии экосистем леса. Показано, что в конце XX века влажные леса заселяла почти половина всех видов земноводных по сравнению с его серединой [1]. В Шацком национальном парке земноводные представлены 12 видами [20]. Прудовая лягушка и гибридная форма рассматриваются как *Rana esculenta complex*.

Гребенчатый тритон и камышовая жаба включены в Красную книгу Республики Беларусь [21], обыкновенная жерлянка, обыкновенная квакша и съедобная лягушка занесены в дополнительный список Красной книги РБ (проф.), требующих дополнительного изучения и внимания в целях профилактической охраны. Ряд видов имеют международный статус охраны (таблица 1).

Таблица 1 – Земноводные юго-запада Беларуси

Виды	Тренд численности	Статус охраны	
		В Беларуси, категории	Международный статус
Обыкновенный тритон <i>Triturus vulgaris</i> L.	↓		
Гребенчатый тритон <i>Triturus cristatus</i> Laur.	↓	2 (NT)	МСОП, Берн II
Краснобрюхая жерлянка <i>Bombina bombina</i> L.	0	Проф. (LC)	МСОП
Обыкновенная чесночница <i>Pelobates fuscus</i> Laur.	0		Берн II
Обыкновенная жаба <i>Bufo bufo</i> L.	0		Берн I
Зеленая жаба <i>Bufo viridis</i> Laur.	↓		МСОП, Берн II
Камышовая жаба <i>Bufo calamita</i> Laur.	↓	3 (VU)	МСОП, Берн II
Обыкновенная квакша <i>Hyla arborea</i> L.	↓	Проф. (LC)	Берн II
Озерная лягушка <i>Rana ridibunda</i> Pall.	↑		
Прудовая лягушка <i>Rana lessonae</i> Camer.	↑		
Съедобная лягушка <i>Rana esculenta</i> L.	?	Проф. (LC)	
Остромордая лягушка <i>Rana terrestris</i> Nils.	↓		
Травяная лягушка <i>Rana temporaria</i> L.	0		

Примечание – ↓ численность снижается; 0 – численность стабильна; ↑ – численность увеличивается; ? – тренд численности не определен

Изменчивость распределения амфибий по экосистемам проявляется в характере освоения наиболее типичных естественных и трансформированных экосистем. Она зависит от экологической пластичности видов и экологической емкости мест обитания. Наименьшее видовое разнообразие характерно для сосняков, болот, агроценозов и гордов (40 – 60% от общего числа видов батрахофауны).

Самыми благоприятными экосистемами являются ольшаники, широколиственно-сосновые, лиственные и смешанные леса, их экотоны, прибрежные экосистемы, луга с кустарниковыми экотонами (70–90% видов) (таблица 2).

Среди амфибий самыми эвритопными видами являются остромордая и травяная лягушки, серая жаба (80–100% осваиваемых биотопов), затем идет обыкновенный три-



тон, обыкновенная чесночница, зеленая жаба, прудовая лягушка (60–70%). Меньшее число экосистем освоено гребенчатым тритоном, камышовой жабой и озерной лягушкой (40–50%).

Наши наблюдения показали, что начало выхода земноводных из зимовок и ухода их на зимовку зависит в основном от температурных условий и значительно колеблется по годам. В период размножения в водоемах отмечены особи всех видов земноводных, некоторые из них (озерная, прудовая, травяная и остромордая лягушки) образуют скопления до 3 тыс. ос./га. Такие скопления характерны также и для сеголеток, которые регистрируются в прибрежных экосистемах.

Таблица 2 – Освоение амфибиями естественных и трансформированных экосистем в летний период (+ – присутствие вида; - – отсутствие вида)

Вид	Экосистемы										Общая освоенность, %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Обыкновенный тритон	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	60,0
Гребенчатый тритон	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	40,0
Краснобрюхая жерлянка	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	50,0
Обыкновенная чесночница	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	60,0
Серая жаба	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	80,0
Зеленая жаба	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	60,0
Камышовая жаба	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	50,0
Обыкновенная квакша	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-	60,0
Озерная лягушка	-	-	+	-	-	+	+	-	+	-	40,0
Прудовая лягушка	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	70,0
Остромордая лягушка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100,0
Съедобная лягушка	+	-	+	-	-	+	+	+	-	-	50,0
Травяная лягушка	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	90,0

Примечание – 1 – широколиственно-сосновый лес; 2 – смешанный лес; 3 – ольшаники; 4 – сенокосы; 5 – пойменные низины и луга; 6 – стоячие водоемы (старичьи рек, озера, пруды, мелиоративные каналы); 7 – болота; 8 – агроценозы (поля, огороды, сады); 9 – трансформированные экосистемы (парки, лесовырубки, лесополосы, пустыри); 10 – поселения человека

Обыкновенный тритон. В Беларуси является обычным видом, встречается везде, где имеются водоемы для размножения. В юго-западной Беларуси предпочитает лиственные и смешанные леса, луга в поймах рек: З. Буг, Лесная, Мухавец, Гривда, отмечался в населенных пунктах Орхово, Томашовка, Любищицы, Пески и др. (таблица 2). Размножается в стоячих водоемах, озерах Ореховское и Селяхи. Период размножения растянут с конца марта до конца июня [7, наши данные]. В апреле наиболее часто отмечается скопление тритонов возле кладок икры бурых лягушек, где самые прогреваемые мелководные участки водоемов. Обыкновенный тритон находится в водоемах до конца июня – первой половины июля. Позже встречается в прибрежных биоценозах, на опушках смешанных и лиственных лесов, заболоченных ольсах, в населенных пунктах. В период размножения они активны почти круглые сутки, а при обитании на суше их активность резко падает. Днем тритоны скрываются в различных убежищах, предпочи-



тая тенистые и влажные места: под лесной подстилкой, кучами хвороста и листьев, штабелями дров, под корягами и пнями, под отставшей корой деревьев, в брошенных норах грызунов, иногда встречаются и на открытых участках. На суше кормятся в сумерках и ночью, а после дождя встречаются и днем при поедании дождевых червей.

Отметим, что плотность обыкновенного тритона слабо изучена из-за скрытого образа жизни после размножения, что не дает возможности провести полноценный учет. Наименьшая плотность выявлена в смешанных лесах – 5,3 ос./га, самая высокая – в стоячих водоемах – 24,0 ос./га (таблица 3).

Гребенчатый тритон. В Беларуси распространен по всей территории, более фрагментарно, чем обыкновенный тритон. Численность более низкая [7]. Обитает в тех же биотопах, что и обыкновенный тритон (таблица 2). Весну и лето проводит в водоемах, предпочитая более глубокие водоемы (0,5–0,7 м), чем обыкновенный тритон [7]. После брачного сезона выходит на сушу. В этот период днем скрывается в укрытиях. Охотится ночью, в дождливые дни и днем. На зимовку уходит во второй половине октября – ноябре, когда среднесуточная температура становится ниже 3–4° С. Зимуют обычно на суше.

Численность в последние годы снижается. Плотность гребенчатого тритона в широколиственно-сосновом лесу биосферного резервата «Западное Полесье», по нашим данным, в среднем была 3,8 экз./га, в стоячих водоемах поймы р. З. Буг – 8,6 экз./га. Плотность населения гребенчатого тритона в Беларуси в видоспецифических биотопах составляет 2,4–5,6 экз./га [9].

Вид включен в Красную книгу Республики Беларусь [21]. Угрозой для гребенчатого тритона являются усиливающаяся рекреационная нагрузка на места обитания вида и загрязнение, осушение, исчезновение водоемов, вырубка лесов, урбанизация территорий, увеличение сети дорог, роющая деятельность кабанов [21, наши данные]. Гребенчатый тритон является индикаторным видом чистоты водоемов.

Краснобрюхая жерлянка. В Беларуси распространена в южной и центральной частях [7]. В Брестской области встречается в видоспецифических биотопах (старицы рек, пруды, болота, мелиоративные каналы, заболоченные луга, временные лужи на полях, опушки леса и др.). Весной и летом обитает в водоемах и прибрежных экосистемах. В поймах рек З. Буг, Гривда, Лесная, Мухавец и Припять на 100 м береговой линии, стариц и мелиоративных каналов встречается от 3 до 50 особей краснобрюхой жерлянки. Выходит из зимовки во второй половине марта, когда температура воздуха устойчиво переходит через 0°С, уходит на зимовку в конце октября – ноябре. К размножению приступает в апреле при достижении температуры воды 12–14°С. В это время самцы издадут брачные крики.

Период суточной активности краснобрюхой жерлянки зависит от погодных условий (температура, ветер). В большинстве случаев при тихой теплой погоде (при температуре воздуха днем не ниже 20°С) жерлянки активны на протяжении всего светового времени суток, а также в сумерках и иногда ночью.

Плотность краснобрюхой жерлянки (ос./га) в пойменных лугах рек З. Буга, Гривды, Мухавца составляет 10–60, в среднем 38,8; в лесных экосистемах Брестского, Малоритского и Ивацевичского лесхозов: ольшанике – 4–40, в среднем 22,0; в широколиственно-сосновом лесу – 5–60, в среднем 30,5; в агроценозах Брестского, Кобринского, Ивацевичского районов – 0–90, в среднем 45,6 (таблица 3). Отмечено снижение численности вида в последние годы. Вид включен в аннотированный список Красной книги Республики Беларусь [21].



Обыкновенная чесночница. Вид распространен по всей территории Беларуси. В Брестской области нами отмечалась во всех районах: обычна в поймах рек и озер, на лугах. Встречается в широколиственных и смешанных лесах Брестского, Малоритского, Ивацевичского лесхозов. Предпочитает поля, огороды, сады, парки и другие местообитания, где рыхлая почва (Брестский, Каменецкий, Ивацевичский, Столинский и др. районы) (таблица 2). Весной появляется в третьей декаде марта – первой половине апреля, уходит на зимовку в сентябре – начале октября. Зимует на суше в различных убежищах (норы грызунов и др.) или зарывается в почву на глубину 10–30 см. Размножается в водоемах, глубина которых 50–70 см, иногда во временных водоемах. На поверхности почвы находится в сумеречные, вечерние, ночные и утренние часы, днем встречается редко.

Плотность обыкновенной чесночницы (ос./га) в ряде изученных экосистем Ивацевичского лесхоза составляет: в широколиственно-сосновом лесу Ивацевичского лесничества в среднем 12,0; в пойменных лугах рек Гривда, Мухавец в среднем 43,3; в агроценозах (д. Любищицы Ивацевичского района, д. Пески Кобринского района, д. Семигостицы Столинского района) 4–150, в среднем 86,5 (таблица 3). Численность стабильна. По литературным данным плотность чесночницы в Беларуси широко варьирует от 10 до 100, иногда до 2000 экз./га [8].

Серая жаба. Распространена на всей территории Беларуси [7]. В регионе регистрируется во всех районах. Предпочитает влажные участки леса (ольшаники, широколиственные и смешанные леса Томашовского, Домачевского лесничеств Брестского лесхоза, Ивацевичского лесничества Ивацевичского лесхоза) и пойменные луга. Встречается в агроэкосистемах: огородах, полях, парках, садах, мелиоративных системах Брестского, Каменецкого, Ивацевичского, Столинского и др. районов (таблица 2). Изучение циркадианных биоритмов этого вида показало, что серая жаба наиболее активна в сумерках, но бывает активна и днем. В жаркие дневные часы скрывается в убежищах, в лесной подстилке. Среди жаб региона она самая холодостойкая. Пробуждается весной во второй декаде марта – первой декаде апреля, уходит на зимовку в октябре – ноябре. Зимует в норах, под толстой лесной подстилкой, в подвалах, погребах. К размножению приступает в середине апреля, когда вода прогревается до температуры 6–8°C.

Плотность (ос./га) серой жабы составляет: в широколиственно-сосновых лесах 18–70, в среднем 44,2; в ольшанике – 30–100, в среднем 62,0; в пойменных лугах З. Буга, Мухавца, Лесной – 10–50, в среднем 32,0 ос./га (таблица 3). В основных видоспецифических экосистемах численность стабильна, флуктуирует. По литературным данным плотность, серой жабы в Беларуси составляет 15–50 (до 500) экз./га [8].

Зеленая жаба. В Беларуси и регионе является обычным видом земноводных, численность которого значительно ниже серой жабы. Вид в регионе предпочитает открытые экосистемы, чаще встречается в поймах водоемов (реки З. Буг, Мухавец, Лесная, озера Селяхи, Белое и др.), на полях, огородах, обычна в поселениях человека (д. Каменюки Каменецкого района, д. Пески Кобринского района, д. Любищицы Ивацевичского района, деревни Орхово, Томашовка, Леплевка Брестского района и др.). Активна в сумерках. Приведем один пример. На территории лагеря полевых практик БрГУ (д. Орхово, Брестский район) в нише бетонного крыльца в 2006–2011 гг. жила группа из 4–7 особей зеленых жаб, которые в сумерках выходили из убежища в поисках корма по территории лагеря, даже заходили в спальный корпус преподавателей.

Весной пробуждается во второй – третьей декадах апреля, на зимовку уходит в сентябре. Период размножения начинается обычно в первой декаде мая, при прогрева-



нии воды на отмелях до 16–18°C. Брачный период (спаривание и икрометание) растянут с мая до июня.

Плотность зеленой жабы была: в пойменных лугах рек З. Буг, Гривды, Лесной – 4–50, в среднем 28,0 ос./га; в деревнях Орхово, Любищицы – 0–54, в среднем 31,0 ос./га (таблица 3). Численность в последние годы стабильна. Плотность в различных экосистемах Беларуси варьирует обычно в пределах 5–30 (до 300) экз./га [8].

Камышовая жаба. В Беларуси проходит восточная граница ареала вида. Предполагаемая граница ареала проходит примерно по линии Полоцк – Лепель – Бобруйск [7]. Встречается камышовая жаба в юго-западной, западной и центральной Беларуси. В регионе отмечена в различных экосистемах большинства исследуемых районов, в НП «Беловежская пуца» и биосферном резервате «Западное Полесье» (белорусский сектор). Предпочитает широколиственно-сосновые и сосновые леса, произрастающие на песчаных почвах, которые граничат с заболоченными местами и водоемами (Ивацевичское лесничество Ивацевичского лесхоза, Томашовское лесничество Брестского лесхоза, окрестности прудов у д. Комаровка, Домачевские пруды, озеро Селяхи и др.), а также открытые биотопы (суходольные луга и поля) с мелководными водоемами, в долинах рек Гривда и Припять. У камышовой жабы достаточно четко выражены суточные и годовые биоритмы. Активна она в сумерках, а в пасмурную, дождливую погоду встречается и днем. Пробуждается весной в конце апреля – первой половине мая, уходит на зимовку в сентябре. Зимует в различных убежищах, или зарывается в почву. Период размножения приходится на май – июнь. Камышовая жаба является хорошим индикаторным видом, чутко реагирующим на изменения биотопов под воздействием антропогенных и природных факторов.

Плотность камышовой жабы в широколиственно-сосновом лесу Томашовского лесничества в окрестностях прудов составляла 0–50, в среднем 26,0 ос./га; там же в сосновом лесу – 0–18, в среднем 8,2 ос./га (таблица 3). В ряде случаев в 2004–2011 гг. трупы камышовых жаб (6 особей) находили на лесной дороге, идущей вдоль прудов к домику лесника в Томашовском лесничестве, а также на отрезке шоссеиной дороги Домачево – Томашовка (10 экз.). В последнее десятилетие численность снижается, флуктуирует. По литературным данным, плотность камышовой жабы обычно составляет 0,02–3,3 экз./га, максимальная – 25–200 экз./га [13].

Камышовая жаба включена в Красную книгу РБ [21]. Факторами угрозы для камышовой жабы являются: изменения мест обитания под воздействием деятельности человека, гибель от автотранспорта на дорогах, исчезновение водоемов для размножения, выпас скота.

Обыкновенная квакша. Распространена в южной и западной части Беларуси [7; наши данные]. В регионе населяет широколиственные и смешанные леса, ольшаники (Брестский, Малоритский, Ивацевичский лесхозы), берега мелиоративных каналов, луга с куртинами леса и кустарниками, населенные пункты с садами (деревни Орхово, Томашовка, Пески, Любищицы, Каменюки и др.). Непременным условием для мест обитания является наличие вблизи водоемов, в которых квакша размножается. Пробуждается весной в первой половине апреля, уходит на зимовку в октябре. Зимует в норах и дуплах грызунов, под лесной подстилкой, в подвалах, погребах. В конце апреля – мае происходит спаривание и икрометание, когда температура воды на мелководьях прогревается до +15 – +20°C. Активны квакши в сумерках.

Плотность (ос./га) населения этого вида (таблица 3) в некоторых экосистемах составляет: в широколиственно-сосновом лесу Ивацевичского лесничества Ивацевич-



ского лесхоза и Томашовского и Домачевского лесничеств Брестского лесхоза – 8–60, в среднем 36,5; в ольшанике там же – 6–96, в среднем 58,4; в пойме рек З. Буг, Гривда, Лесная – 20–124, в среднем 70,0. Отмечено снижение численности в последнее десятилетие. По литературным данным, плотность обыкновенной квакши в Беларуси варьирует в пределах 5–30, иногда достигает 550 экз./га [8].

Вид охраняемый (таблица 1).

Озерная лягушка. В Беларуси и регионе распространена мозаично по всей территории [7]. Населяет непересыхающие водоемы, глубина которых не менее 20 см: старицы рек, пруды, водохранилища (Селец, Луковское) и озера (Выгоновское, Споровское, Белое, Селяхи), каналы, а так же прибрежные экосистемы, берега больших и малых рек (Припять, Гривда, Мухавец, Лесная, Горынь, Ясельда). Активна практически в течение суток, пик активности приходится на период с 12 до 17 часов. Охотится в основном на суше по берегам водоемов. При опасности скрывается в воде. Озерные лягушки появляются после зимовки обычно в первой декаде апреля, в ранние и теплые весны на 8–12 дней раньше, в холодные и поздние – примерно на столько же дней позже. Уходят на зимовку в октябре, когда температура воды снижается до 4–9°C. Спаривание и икрометание происходит в конце мая – июне, когда среднедневная температура воды достигает 13–15°C, массовое икрометание – при температуре на поверхности воды 17–19°C.

Плотность в стоячих водоемах колеблется от 30 до 210 ос./га, в среднем 152,0, в других экосистемах плотность значительно ниже (таблица 3). На 100 м береговой линии водоемов отмечено от 8 до 76 особей. В последние годы численность стабильна. Плотность озерной лягушки в Беларуси составляет 5–40, иногда достигает 250 экз./га [8].

Прудовая лягушка. Распространена мозаично, как и предыдущий вид, на территории Беларуси [7]. Обитает в регионе в разнообразных водоемах, водохранилищах (Луковское, Селец, Локтыши), водотоках за исключением быстрых рек. Отмечена во влажных пойменных лесах, ольшаниках Малоритского, Ивацевичского и Брестского лесхозов, пойменных лугах (таблица 2). Биология прудовой лягушки: выход из зимовки, размножение, характер зимовки и др. весьма сходны с таковыми озерной лягушки, с которой она может спариваться и образовывать гибридную форму.

Плотность (ос./га) прудовой лягушки в ряде экосистем составляет: в широколиственно-сосновых лесах 6–42, в среднем 26,0; в ольшанике – 4–45, в среднем 28,0; в смешанном лесу – 0–30, в среднем 16,0, в стоячих водоемах в среднем 42,2 (таблица 3). Плотность прудовой лягушки в Беларуси по данным литературы составляет 5–60 до 330 экз./га [8]. В последнее десятилетие численность увеличивается.

Съедобная лягушка. Она является гибридом озерной и прудовой лягушек. Биология съедобной лягушки почти такая же, как и у прудовой лягушки. В последние десятилетия изучению гибридного комплекса зеленых лягушек уделяется большое внимание [7].

Остромордая лягушка. Распространена по всей территории Беларуси [7]. Обитает в регионе в разнообразных экосистемах: в различных типах леса, на лугах, болотах, полях, огородах, садах, парках, населенных пунктах. Предпочитает увлажненные экосистемы: лиственные и смешанные леса, ольшаники, пойменные луга. При изучении суточных и годовых биоритмов выяснили, что она активна в основном в сумерках. После зимовки появляется во второй половине марта. Лягушки приступают к спариванию и икрометанию, когда вода в верхних горизонтах водоемов прогревается до 13–14°C. Уходит на зимовку в конце сентября – октябре, когда температура воздуха снижается до 6–8°C. Зимует в норах грызунов, в кучах листвы, погребах, подвалах.



В ряде экосистем плотность (ос./га) остромордой лягушки составляет: в широколиственно-сосновых лесах Ивацевичского и Брестского лесхозов 80–210, в среднем 160,0; в ольшанике там же – 130–610, в среднем 406,0; в смешанном лесу – 60–210, в среднем 150,0; в пойменных лугах – 110–520, в среднем 360,0 (таблица 3). В Беларуси плотность остромордой лягушки обычно варьирует в различных биотопах в пределах 100–400 экз./га и может достигать 6000 экз./га [8].

В последнее десятилетие отмечено снижение численности. Остромордая лягушка играет важную роль в функционировании естественных и трансформированных экосистем, является типичным индикаторным видом.

Травяная лягушка. Распространена по всей территории Беларуси и региона [7; наши данные]. Населяет в Брестской области различные типы леса Брестского, Столинского, Ивацевичского лесхозов, предпочитая более увлажненные их участки, пойменные луга, дачные поселки, огороды, сады и парки. Активна как в вечернее время, так и днем. Весной обычно пробуждается в середине марта, в холодные и затяжные весны – позже на 10–15 дней, в ранние – примерно на столько же дней раньше. Зимует на дне быстро текущих рек (Мухавец, Лесная, Ясельда, Рита), в водоемах с выходом ключевой воды. Приступает к размножению при прогреве поверхностных слоев воды до 9–10°C, массовый нерест происходит при более высокой температуре (12–14°C).

Плотность (ос./га) травяной лягушки в ряде экосистем составляет: в ольшанике Ивацевичского и Брестского лесхозов – 20–144, в среднем 76,5; в широколиственно-сосновом лесу там же – 10–96, в среднем 52,4; в пойменных лугах – 20–186, в среднем 90,5; в агроценозах – 0–24, в среднем 10,5 (таблица 3). Плотность травяной лягушки в различных биотопах Беларуси и в различные годы несколько уступает плотности остромордой лягушки и варьирует в пределах 50–400, иногда до 3000 экз./га [8].

В последние годы численность поддерживается на стабильном уровне. Травяная лягушка может быть индикаторным видом таких экосистем, как пойменные луга, ряд лесных экосистем и агроценозов.

Было показано [7; наши данные], что по ряду фенолого-биологических показателей (сроки икрометания, его продолжительность, температурный режим) у земноводных выделяют 4 группы: ранневесенние с коротким периодом размножения (травяная и остромордая лягушки, серая жаба); поздневесенние с коротким периодом размножения (чесночница и комплекс зеленых лягушек); весенне-раннелетние с длительным периодом размножения (обыкновенный тритон); летние с длительным периодом размножения (зеленая и камышовая жабы, краснобрюхая жерлянка, квакша и гребенчатый тритон).

В 1990–2012 гг. в Беларуси и Брестской области продолжалось потепление климата, начавшееся в конце 1980-х гг. В этот период среднегодовые температуры воздуха были выше многолетней климатической нормы на 1–2°C [22].

В Брестской области средняя температура в 2005–2009 гг. по сезонам года варьировала в пределах: зимой от -0,1 в 2007 г. до -5,5°C в 2006 г.; весной – от 6,4 в 2006 г. до 9,6°C в 2007 г.; летом – от 17,6 в 2005 г. до 18,8°C в 2007 г.; осенью – от 7,0 в 2007 г. до 9,2°C в 2009 г. [22]. Для жизнедеятельности земноводных наибольшее значение имеют температуры воздуха и почвы и ее отклонения от нормы в марте – июне, когда они выходят из зимовки и начинают размножаться, и температура в сентябре – ноябре, когда животные уходят на зимовку.

Динамика температуры воздуха в 2004–2011 гг. на метеоплощадке г. Бреста приведена в таблице 4. Во все годы исследования среднемесячная температура воздуха в феврале – мае и сентябре – ноябре отклонялась от нормы. Самой теплой была весна в



2008 г., когда температура в феврале была выше нормы на 5,8, в марте – на 2,8 и в апреле – на 2,4°C; самая теплая осень была в 2006 г., когда температура в сентябре – ноябре была выше нормы на 2,2–2,5°C.

Таблица 4 – Ход температуры воздуха (°C) в 2004–2009 гг. в г. Бресте (по данным метеостанции)

Месяц	Норма	Отклонения от нормы, lim	Средняя температура, lim
I	-4,5	0,3–5,8	-7,9–0,3
II	-3,5	0,3–5,8	-5,0– -2,3
III	0,7	0,2–2,8	-0,8–3,5
IV	7,3	1,3–2,4	8,0–9,7
V	13,6	0,1–1,5	12,1–14,0
VI	16,7	0,3–1,5	16,3–18,2
VII	18,4	0,1–4,2	19,1–22,6
VIII	17,4	0,4–2,0	17,8–19,4
IX	13,3	0,0–2,2	12,7–15,5
X	7,7	0,5–2,5	9,2–10,2
XI	2,6	0,2–2,6	2,8–5,0
XII	-1,8	0,3–1,5	-1,0–3,3

О разнице между температурой почвы, в которой проводят зимовку ряд земноводных, и температурой воздуха можно судить по следующим данным. Температура почвы на паровом поле на глубине 10 см на супесчаной почве выше температуры воздуха в мае на 1,2, в июне – на 2,0, в июле – на 2,3°C. Температура почвы теплее температуры воздуха в августе – октябре на 1,8–0,5°C; суглинистые почвы имеют температуру ближе к температуре воздуха. Почва, покрытая растительностью, летом холоднее оголенной на 1–3°C и зависит от характера растительности [23]. У всех видов земноводных региона достаточно четко выражены годовые или цирканнуальные биоритмы, некоторые аспекты которых рассматривались в учебном пособии [24].

Сроки ухода на зимовку и выхода из зимовки, сроки размножения земноводных отражены в повидовых очерках. Установлено, что повышение среднедекадной и среднемесячной температуры весной в 1990–2012 гг. оказало влияние на сроки пробуждения и размножения, а осенью – на сроки ухода на зимовку земноводных. Это в большей мере отразилось на более холодолюбивых видах (серая жаба, остромордая и травяная лягушки), которые выходят из зимовки при прогревании воздуха до 2–4°C, осенью уходят на зимовку при прогрессирующем снижении температуры воздуха 6–4°C. Эти земноводные относятся к группе ранневесенних земноводных с коротким периодом размножения. В ранние и теплые весны амфибии пробуждаются и приступают к размножению на 10–15 и более дней раньше среднемноголетних сроков. В теплые и поздние осенние сезоны земноводные уходят на зимовку примерно на столько же дней позже по сравнению с нормой.

На сроки выхода из зимовки и ухода их на зимовку теплолюбивых видов земноводных (зеленая и камышовая жабы, краснобрюхая жерлянка, квакша, гребенчатый тритон) изменение температуры не оказывает существенного влияния. Представители этой группы размножаются в водоемах при температуре воды +15–+25°C. Сезон раз-



множения приходится на май – конец июня. Отметим, что один и тот же водоем в течение сезона попеременно используют от 2–3 до 5–8 видов, значительно реже – до 10 видов земноводных.

К основным факторам, которые воздействуют на состояние популяций земноводных в юго-западной Беларуси, относятся: преобразование мест обитания и размножения, мелиоративное строительство и сельскохозяйственная деятельность; нарушение технологии применения минеральных удобрений и ядохимикатов; загрязнение среды обитания химикатами; выпас и прогон крупнорогатого скота на лугах, полях, лесных полянах, опушках леса.

Значительный ущерб амфибиям наносит резко возросшая в последние десятилетия рекреационная нагрузка на лесные (сбор ягод и грибов) и прибрежные экосистемы региона (рыбалка, отдыхающие): реки З. Буг, Мухавец, Лесная, Припять, Ясельда; озера Рогозьянское, Выгонощанское, Бобровичское, Белое, Селяхи; Домачевские пруды и др. Например, только на территории Брестского района находятся санаторий «Берестье», курорт «Белое озеро», 12 туристических баз, в которых пребывают ежедневно сотни отдыхающих в течение года, особенно их много в выходные и праздничные дни летом – из числа жителей г. Бреста. В связи с этим крайне важна разъяснительная, пропагандистская работа с населением (плакаты, статьи, популярные книги, беседы и т.д.) о роли амфибий в экосистемах и жизни человека.

Заключение

На территории Брестской области выявлено 13 видов земноводных. Наиболее широко распространены серая жаба, остромордая и травяная лягушки. Гребенчатый тритон и камышовая жаба включены в основные категории Красной книги Республики Беларусь, а краснобрюхая жерлянка, обыкновенная квакша и съедобная лягушка занесены в аннотированный список видов Красной книги РБ, требующих дополнительного изучения и внимания в целях профилактической охраны [21].

Ряд видов – гребенчатый тритон, камышовая и серая жаба, остромордая, травяная и озерная лягушка – могут быть индикаторными видами состояния видоспецифических экосистем региона.

По обилию и богатству видового состава земноводных в Брестской области первостепенное положение занимают террасные экосистемы водоемов, лесные, а также кустарниковые экосистемы пойм рек.

Современная хозяйственная деятельность человека, мелиорация земель не приводит к созданию таких экосистем, которые были бы не пригодны для различных видов или хотя бы одного вида амфибий региона. На это указывает обитание многих видов амфибий в трансформированных экосистемах, в экотонах сельхозугодий (пограничные зоны с лесом, кустарниковыми зарослями, лесопосадками, прибрежные зоны рек, озер, рыбхозов, мелиоративные каналы, села и деревни).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банников, А.Г. Материалы к изучению земноводных и пресмыкающихся Беловежской пуцци / А.Г. Банников, З.В. Белова // Уч. Моск. гор. пед. ин-та им. В.П. Потемкина. – 1956. – Т. 61. – Вып. 4–5. – С. 385–402.



2. Голодушко, Б.З. Численность амфибий и рептилий и их роль в питании канюка и малого подорлика Беловежской пуши / Б.З. Голодушко // Фауна и экология наземных позвоночных Белоруссии. – Минск, 1961. – С. 143–149.
3. Бахарев, В.А. Особенности биологии камышовой жабы в Беловежской пуше / В.А. Бахарев // Животный мир Белорусского Полесья, охрана и рациональное использование : тез. докл. IV обл. итог. науч. конф., Гомель, 1985. – Гомель : ГГУ, 1985. – С. 12–13.
4. Бахарев, В.А. Численность и особенности биотопического распределения земноводных и пресмыкающихся в Беловежской пуше / В.А. Бахарев // Животный мир Белорусского Полесья, охрана и рациональное использование : тез. докл. IV обл. итог. науч. конф., Гомель, 1985. – Гомель : ГГУ, 1985. – С. 13–14.
5. Бахарев, В.А. Динамика батрахофауны пуши как результат сукцессии экосистем леса / В.А. Бахарев // Структурно-функциональное состояние биологического разнообразия животного мира Беларуси : тез. докл. VIII зоол. науч. конф. ; редкол.: М.М. Пикулик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Право и экономика, 1999. – С. 152–153.
6. Гайдук, В.Е. Фауна земноводных и пресмыкающихся Брестской области / В.Е. Гайдук, В.А. Жук, Е.С. Блоцкая // Животный мир Белорусского Полесья, охрана и рациональное использование : тез. докл. V обл. итог. науч. конф., Гомель, 1988 г. ; редкол.: Б.П. Савицкий (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ, 1988. – Ч. 1. – С. 73–75.
7. Пикулик, М.М. Земноводные Белоруссии / М.М. Пикулик. – Минск : Наука и техника, 1985. – 191 с.
8. Земноводныя. Паўзуны : Энц. даведнік / Пад рэд. чл.-карэсп. АН Беларусі М.М. Пікуліка. – Минск : БелЭн., 1996. – 240 с.
9. Пикулик, М.М. Особенности состояния герпетофауны на мелиоративной территории в регионе верховьев реки Ясельды / М.М. Пикулик, С.В. Косов, А.А. Лещецкий // Животный мир Белорусского Полесья, охрана и рациональное использование : тез. докл. IV обл. итог. науч. конф.– Гомель : ГГУ, 1985. – С. 123–124.
10. Пикулик, М.М. Сравнительная оценка состояния фауны амфибий и рептилий в приустьевно-пойменной зоне Припяти на разных участках ее течения / М.М. Пикулик [и др.] // Животный мир Белорусского Полесья, охрана и рациональное использование : тез. докл. III обл. итог. науч. конф., Гомель, 1983 г. / редкол.: Б.П. Савицкий (отв. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ, 1983. – С. 36–37.
11. Пикулик, М.М. Ландшафтно-экологическая детерминированность биологического разнообразия герпетофауны / М.М. Пикулик // Проблемы изучения, сохранения и использования биологического разнообразия животного мира : тез. докл. VII зоол. конф., Минск, 27–29 сентября 1994 г. ; редкол.: М.М. Пикулик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Навука і тэхніка, 1994. – С. 334–336.
12. Пикулик, М.М. Основные положения ландшафтной герпетологии / М.М. Пикулик // Проблемы ландшафтной экологии животных и сохранения биоразнообразия : мат. Республ. науч.-практ. конф., Минск, 28–29 декабря 1999 г. / редкол.: М.М. Пикулик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГПУ, 1999. – С. 37–45.
13. Новицкий, Р.В. Камышковая жаба в Беларуси: статус и перспективы сохранения / Р.В. Новицкий // Красная книга Республики Беларусь: состояние, проблемы, перспективы : мат. Респ. науч. конф., Витебск, 12–13 дек. 2002 г. / редкол.: В.Я. Кузьменко (отв. ред.) [и др.]. – Витебск : Изд-во ВГУ им. П.М. Машерова, 2002. – С. 166–177.
14. Дробенков, С.М. Современное состояние и проблемы охраны редких видов герпетофауны Беларуси / С.М. Дробенков [и др.] // Красная книга Республики Бела-



рუსь: состояние, проблемы, перспективы : мат. Респ. науч. конф., Витебск, 12–13 дек. 2002 г. / редкол.: В.Я. Кузьменко (отв. ред.) [и др.]. – Витебск : Изд-во ВГУ имени П.М. Машерова, 2002. – С. 20–22.

15. Дробенков, С.М. Фенология размножения как фактор экологической дифференциации амфибий / С.М. Дробенков // Биологические ритмы : мат. Междунар. науч.-практ. конф., Брест–Каменюки, 26–28 апреля 1999 г. ; редкол.: В.Е. Гайдук (гл. ред.) [и др.]. – Брест : БрГУ, 1999. – С. 77–79.

16. Дробенков, С.М. Структурная организация герпетокомплексов Белорусского Полесья / С.М. Дробенков // Проблемы экологии и экологического образования в постчернобыльский период : мат. Междунар. науч.-практ. конф., Мозырь, 2000 г.; редкол.: В.В. Валетов (гл. ред.) [и др.]. – Мозырь : Белый ветер, 2000. – С. 180–182.

17. Дробенков, С.М. Количественный состав и численность ассоциаций земноводных и пресмыкающихся в биоценозах Беларуси / С.М. Дробенков // Структурно-функциональное состояние биол. разнообразия жив. мира Беларуси : тез. докл. VIII зоол. науч. конф., Минск / НАН Беларуси. Ин-т зоол.; редкол.: Б.И. Бычкова [и др.]. – Минск, 1999. – С. 158–159.

18. Хандогий, А.В. Состояние фауны амфибий естественных и мелиорированных зон рек Беларуси : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.08. – Зоология / А.В. Хандогий. – Минск, 1995. – 20 с.

19. Янчуревич, О.В. Репродуктивная биология и структура земноводных в урбанизированном ландшафте : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.08. – Зоология / О.В. Янчуревич ; ГНУ «Институт зоологии НАН Беларуси». – Минск, 2006. – 24 с.

20. Горбань, Л.І. Земноводні Шацького національного природного парку та їх охорона / Л.І. Горбань // Науковий вісник Волинського національного університету імені Лесі Українки, 2009. – С. 198–200.

21. Красная книга Республики Беларусь. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / гл. редкол.: Л.И. Хоружик (пред.) [и др.]. – Минск : Беларуская энцыклапедыя, 2004. – 320 с.

22. Состояние окружающей среды Республики Беларусь : нац. доклад. – Минск : Белтаможсервис, 2010. – 150 с.

23. Агроклиматический справочник. – Минск : Урожай, 1970. – 248 с.

24. Гайдук, В.Е. Основы биоритмологии / В.Е. Гайдук. – Брест: Изд-во БрГУ имени А.С. Пушкина, 2003. – 250 с.

V.E. Gaiduk, E.S. Blockaja, I.V. Abramova Dissemination, habitat distribution, abundance, diurnal and seasonal biorhythms amphibians in the south-western Belarus

In the article presents the data of long-term of research (1967–2012 years) dissemination, habitat distribution, abundance, diurnal and seasonal biorhythms amphibians. Analyzes the contemporary status of amphibians in the region and their guards. In the south-western Belarus inhabits of 13 species of amphibians: *Triturus vulgaris* L., *T. cristatus* Laur. *Bombina bombina* L., *Pelobates fuscus* Laur., *Bufo bufo* L., *B. viridis* Laur., *B. calamita* Laur., *Hyla arborea* L., *Rana ridibunda* Pall., *R. lessonae* Camer., *R. esculenta* L., *R. terrestris* Nils., *R. temporaria* L. Inhabit different habitats.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 01.10.2013



УДК 612.66:577.346

М.В. Головач

АДАПТАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ШКОЛЬНИКОВ 9-10 ЛЕТ, ПРОЖИВАЮЩИХ В РАЙОНЕ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Проведен анализ литературных источников о влиянии загрязнения радионуклидами на адаптационные возможности кардиореспираторной системы детей 9–10 лет на различных этапах учебного года. Многочисленные данные отечественных и зарубежных физиологов, а также результаты наших исследований указывают, что основным индикатором адаптивных реакций организма человека и коррекции его адаптационных возможностей в условиях низкоинтенсивного радиоактивного облучения остается деятельность сердечно-сосудистой системы. Своевременное выявление отклонений адаптационного потенциала сердечно-сосудистой системы от физиологической нормы должно приводить к своевременным её коррекциям.

Введение

Одной из актуальных проблем современных наук (физиологии человека, физиологии спорта, теории и методики физического воспитания и других) является исследование закономерностей процессов адаптации человека к факторам внешней среды. В этом ряду существенное место принадлежит вопросам изучения адаптации учеников в течение учебного года. Проблема ухудшения здоровья и физического развития детей и подростков в последние годы стала достаточно актуальной [1; 2].

На протяжении всей истории развития представлений об управлении адаптационными возможностями человека в центре внимания остается деятельность сердечно-сосудистой системы, которая является основным индикатором адаптивных реакций организма [1–5]. Так изменение параметров сократительной функции миокарда характеризует процесс адаптации к различным физическим нагрузкам у школьников [3; 6]. Адаптационный процесс регулируется нейрогуморальными механизмами, которые с возрастом претерпевают существенные изменения и окончательно формируются только в старшем школьном возрасте [2, 4, 5]. Интегральный характер адаптационных процессов предполагает необходимость учета всего комплекса факторов, способных оказывать влияние на приспособительные механизмы [4]. Среди факторов, влияющих на здоровье человека, наибольший удельный вес имеют: образ жизни (50–55%), состояние окружающей среды (20–25%), генетические факторы (15–20%) и медицинское обеспечение (10–15%) [8].

Одним из средств оптимизации функционального состояния и нейтрализации сдвигов, которые вызваны напряженностью учебного процесса, является коррекция занятий физической культурой [1; 5; 9].

Значение положительных эффектов адаптации к физическим нагрузкам состоит в том, что они повышают резистентность организма не только к мышечной деятельности, но и к действию других факторов окружающей среды [1; 2]. Особенно важно использовать средства и методы физического воспитания для нормализации функционального состояния детей на начальных этапах систематического обучения в школе [1].

В процессе обучения учителя на уроках физической культуры и здоровья зачастую используют субъективную оценку функционального состояния ребенка, которая



является определяющей в оценке готовности ученика выполнять физические упражнения. Для правильной организации и коррекции урока по физической культуре и здоровью необходимо организовать мониторинг показателей, характеризующих деятельность и состояние анатомо-физиологических систем учеников. Эта система мер должна охватывать все компоненты учебного процесса, включая состояние здоровья, уровни функциональной, физической и координационной подготовленности учеников, а также учитывать экологическое состояние окружающей среды.

После аварии на Чернобыльской АЭС около 70% радиоизотопов выпало на территории Беларуси, создав ряд долгосрочных проблем. Выделившиеся радионуклиды оказывают воздействие на все группы населения, приводя к внешнему и внутреннему облучению [8; 10; 11]. Наибольший вклад вносит гамма-излучение цезия-137 (80% общей радиоактивности) [12]. В настоящее время научных данных о воздействии малых доз радиации на адаптационные возможности кардиореспираторной системы человека недостаточно [8; 13–16].

Оценку адаптационных резервов системы кровообращения детей разного возраста и разной физической подготовки можно определять с помощью функциональных проб [2], и наиболее интегративным показателем для ее оценки, учитывающим множество факторов (ЧСС, АД, возраст, массу тела и рост), является адаптационный потенциал [17]. Отклонения, возникающие в регулирующих системах, предшествуют гемодинамическим, метаболическим, энергетическим изменениям и являются наиболее ранним признаком неблагоприятного течения адаптации у детей [18].

Оценка функционального состояния и физической подготовленности учеников позволит правильно дозировать физические нагрузки применительно к функциональным и адаптационным возможностям организма учеников и тем самым оптимизировать их уровень работоспособности в условиях радионуклидного загрязнения местности.

Учитывая эти факты, можно предположить, что малые дозы радиации оказывают влияние на повышение или понижение адаптационных возможностей младших школьников. Решение данных вопросов позволит оценить состояние функциональных резервов организма детей для последующей коррекции физических нагрузок.

Цель работы

Анализ литературных источников для установления влияния загрязнения радионуклидами на адаптационные возможности кардиореспираторной системы детей 9–10 лет на различных этапах учебного года.

Обсуждение

1. Характеристика района загрязнения. Авария на четвертом блоке Чернобыльской АЭС – крупнейшая ядерная техногенная катастрофа в мировой истории. По масштабам радиоактивного выброса и его последствий она намного превзошла наиболее серьезные из предыдущих аварий: в Уиндскейле (Великобритания, 1957 г.), Три Майл Айленде (США, 1979 г.), на промышленном комплексе «Маяк» (СССР, 1957 г.) [10; 11]. В той или иной мере последствия аварии затронули многие страны, следовательно, можно говорить об ее глобальном характере [10; 11]. В наибольшей степени пострадали Украина, Беларусь и Россия. В первые недели после катастрофы чрезвычайно высокие уровни радиации за счет короткоживущих изотопов, прежде всего ^{131}I , наблюдались по всей территории Беларуси. В последующий период радиоэкологическая обстановка определялась действием долгоживущих изотопов. В их числе ^{137}Cs , ^{90}Sr [10; 11]. Анализ радиоактивного загрязнения Европы ^{137}Cs показывает, что около 35% чернобыльских выпадений этого радионуклида находится на территории Беларуси.



Доаварийное загрязнение территории Беларуси ^{137}Cs за счет глобальных выпадений составляло от $1,5 \text{ кБк/м}^2$ до $3,7 \text{ кБк/м}^2$ в отдельных точках. После чернобыльской аварии на $136,5 \text{ тыс. км}^2$ (66% территории Беларуси) плотность загрязнения почвы цезием-137 превышала 10 кБк/м^2 . Согласно действующему законодательству, одним из критериев отнесения территорий к зоне радиоактивного загрязнения является превышение плотности загрязнения ^{137}Cs величины 37 кБк/м^2 [19]. Такое превышение было установлено для 23% территории Республики Беларусь [20]. В качестве сравнения: аналогичная доля для Украины составляет 7%, европейской части России – 1,5%. Одни эти цифры свидетельствуют о сложности и тяжести последствий чернобыльской аварии для Беларуси. В зоне радиоактивного загрязнения оказалось более 3600 населенных пунктов, в том числе 27 городов, где проживало 2,2 млн человек, то есть около пятой части всего населения Беларуси [10; 11; 19]. Наиболее загрязненными оказались населенные пункты Гомельской (1528), Могилевской (866) и Брестской (167) областей. Максимальный уровень загрязнения почвы ^{137}Cs составлял около $60\,000 \text{ кБк/м}^2$ и наблюдался в отдельных населенных пунктах, как ближней (Брагинский район Гомельской области), так и дальней зоны (Чериковский район Могилевской области). По состоянию на январь 2004 г. площадь загрязнения Беларуси ^{137}Cs с уровнем выше 37 кБк/м^2 составляла $41,11 \text{ тыс. км}^2$, или 19,75% территории. В результате естественного распада цезия-137 площадь радиоактивного загрязнения постепенно уменьшается [20–22]. Департаментом гидрометеорологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь построены прогнозные карты загрязнения ^{137}Cs на 2016 и 2046 гг. К 2016 г. площадь загрязнения Беларуси ^{137}Cs с плотностью 37 кБк/м^2 и более уменьшится в 1,5 раза по сравнению с первоначальной (1986), а к 2046 г. в 2,4 раза (рисунки 1) [10; 11].



Рисунки 1 – Карта плотности загрязнения ^{137}Cs в Республике Беларусь по состоянию на 2006 г. [10]



На сегодняшний день в Республике существует зона отчуждения – Полесский государственный радиационно-экологический заповедник. Зона отчуждения представляет собой территорию площадью 1,7 тыс. км², с которой в течение 1986 года было эвакуировано проживавшее здесь население (24,7 тыс. человек) [20]. С мая 1986 года земли зоны отчуждения были выведены из хозяйственного оборота. Зона отселения сосредоточена на территории в 4,5 тыс. км² в 15 районах Гомельской и Могилевской областей республики [10; 11; 19; 20]. На территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника сосредоточено около 33% выброшенного из аварийного реактора Чернобыльской АЭС ¹³⁷Cs, более 70% ⁹⁰Sr и 97 % изотопов плутония [20].

К сожалению, Лунинецкий район, наряду с другими районами Брестской области, радионуклидное бедствие не обошло стороной (рисунок 2). Из него в 1986 году в районе был эвакуирован один населенный пункт – деревня Добрая Воля, общей численностью 67 человек (по данным переписи населения 2009 года там проживает 21 человек) [20].

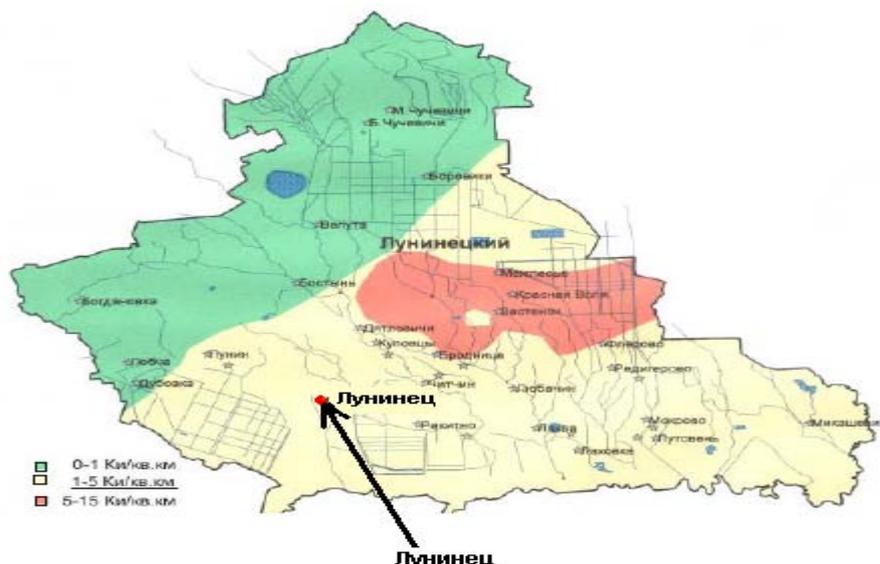


Рисунок 2 – Карта плотности загрязнения цезием-137 в Лунинецком районе по состоянию на 2004 г. [20]

Общая загрязненность земель района ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr – (выше 1 Ки/км²) составляет 84019 га (45119 га сельскохозяйственного назначения; 38900 га лесных угодий), а в городе Лунинец загрязнение цезием-137 находится в пределах 1–5 Ки/км². Выведено из сельскохозяйственного пользования района, в связи с загрязнением радионуклидами – 31 га [20].

2. Состояние сердечно-сосудистой системы младших школьников, проживающих на территории радионуклидного загрязнения.

Влияние занятий физическими упражнениями на сердечно-сосудистую систему младших школьников.

Младший школьный возраст (1 – 4 класс или от 6 – 7 до 12 лет (мальчики до 12 лет, девочки до 11 лет) [9; 23] характеризуется относительно равномерным развитием опорно-двигательного аппарата, но интенсивность роста отдельных размерных при-



знаков его различна, что в свою очередь отражается на состоянии ССС [6]. По мере роста опорно-двигательного аппарата происходит перестроение ССС. Артериальное давление непосредственно связано с размерами тела: у более крупных людей оно, как правило, выше. У детей при выполнении физической нагрузки кровоток в активных мышцах может быть более интенсивным, чем у взрослых, что объясняется более низким периферическим сопротивлением сосудов [6].

Для практики физического воспитания показатели функциональных возможностей детского организма являются ведущими критериями при выборе физических нагрузок, структуры двигательных действий, методов воздействия на организм [5].

В процессе роста и развития ребенка увеличивается масса сердца. У мальчиков 9–10 лет она составляет 111,1 г., что в 2 раза меньше, чем у взрослых (244,4 г.) [23–25]. Наряду с этим изменяется соотношение массы отделов сердца, перестраивается его гистологическая структура. Так, в наибольшей мере увеличение массы сердца происходит за счет левого желудочка [1]. Систематическая тренировка вызывает увеличение массы сердечной мышцы. У юных пловцов, лыжников, велосипедистов, бегунов на средние дистанции размеры сердца увеличиваются больше, чем у других спортсменов [23; 24; 26]. Поскольку у ребенка меньше размеры сердца и общий объем крови, то и сердечный выброс у него меньше как в состоянии покоя, так и при выполнении физической нагрузки [16]. Для детей характерен неустойчивый ритм сердечной деятельности [5; 23; 27; 28]. Он подвержен значительным колебаниям под влиянием внутренних и внешних раздражителей, например, под влиянием температуры окружающей среды (повышение температуры способствует увеличению ЧСС, понижение – уменьшению) [23].

Систолический объем крови и сердечный выброс с возрастом повышаются. В 7 лет систолический объем крови составляет 23 мл, в 13 – 16 лет – 50–60 мл. Прирост его определяет увеличение сердечного выброса. В покое в возрасте от 6 – 9 до 10 лет сердечный выброс равен 2,6 л/мин, в 10 – 12 лет – 3,2 л/мин, в 13 – 16 лет – 3,8 л/мин. Однако при расчете на 1 кг массы тела наблюдается иная картина: чем старше возраст, тем меньше величина сердечного выброса [6; 23]. Таким образом, для детей характерна более напряженная деятельность сердца. Физическая нагрузка оказывает существенное влияние на ЧСС [6; 23–25; 26; 29]. У юных спортсменов, тренирующихся в упражнениях на выносливость, в условиях относительного покоя, как и у взрослых, проявляется брадикардия, однако она выражена меньше [23]. Существенные возрастные различия ЧСС наблюдаются при мышечной деятельности. При одинаковой аэробной нагрузке ЧСС с возрастом уменьшается. Одна и та же работа осуществляется более экономно благодаря меньшей интенсификации сердечной деятельности (рисунок 3) [23; 24].

Таким образом, с возрастом потенциальные возможности сердца повышаются. Адаптация сердечно-сосудистой системы к физическим нагрузкам у детей стоит «дворе», чем у взрослого. Например, в возрасте 9 – 11 лет при увеличении нагрузки на 1 кгм в 1 сек учащение сердцебиений составляет 8,2–9,4 уд/мин, в 12–13 лет – 6,4–9,5 уд/мин, а у взрослых – 3,6–5,3 уд/мин [23].

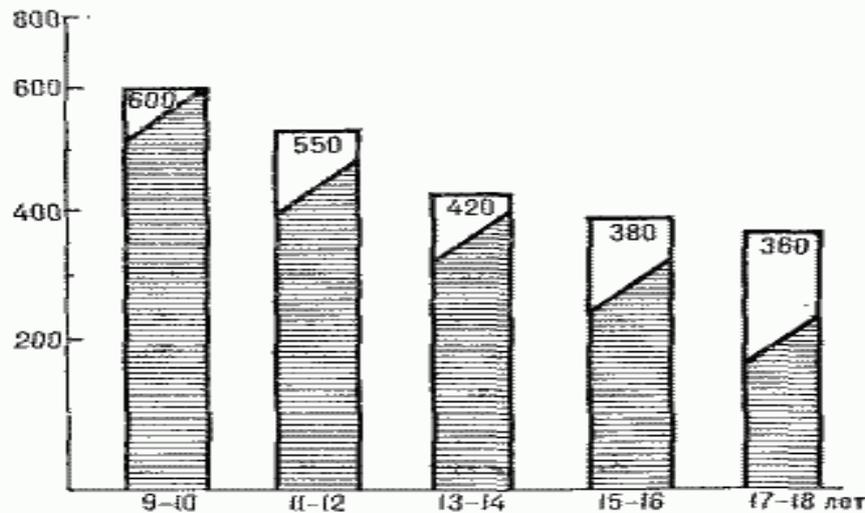


Рисунок 3 – Сумма сердечных сокращений сверх покоя (ордината) при одинаковой нагрузке у школьников разного возраста [5]

У детей при напряженных физических упражнениях максимальная ЧСС находится в обратной зависимости от возраста: чем младше ребенок, тем выше ЧСС [6; 23; 26]. Максимальный артериальный пульс у детей значительно выше, чем у взрослых, однако с возрастом он линейно снижается. Так, у детей до 10 лет максимальная ЧСС очень часто превышает 210 уд./мин, тогда как у 20-летнего человека в среднем составляет 195 уд./мин. Результаты исследований показывают, что максимальная ЧСС снижается на 0,5 уд./мин за год [6]. Систолический объем крови и сердечный выброс с возрастом повышаются. В 7 лет систолический объем крови составляет 23 мл, в 13 – 16 лет – 50 – 60 мл. Прирост его определяет увеличение сердечного выброса [23; 24]. В покое в возрасте от 6 – 9 до 10 лет сердечный выброс равен 2,6 л/мин, в 10 – 12 лет – 3,2 л/мин, в 13 – 16 лет – 3,8 л/мин [23]. Однако при расчете на 1 кг массы тела наблюдается иная картина: чем старше возраст, тем меньше величина сердечного выброса. Таким образом, для детей характерна более напряженная деятельность сердца [23]. В то же время при высокой относительной интенсивности работы, когда ребенку необходимо перемещать только собственную массу тела, этот пониженный сердечный выброс не ограничивает физические возможности ребенка. В беге, например, организму детей с массой тела 25 кг требуется (прямо пропорционально размерам тела) значительно меньше кислорода, чем взрослому человеку с массой тела 90 кг, при этом интенсивность потребления кислорода на килограмм массы тела у обоих практически одинакова [6].

Особенности кровообращения у детей, как в покое, так и при мышечной работе тесно связаны с обменом веществ. Более высокая интенсивность энергетического обмена, относительно большее потребление O_2 (на 1 кг массы тела) предъявляют к сердцу детей значительные требования [23; 25; 26]. Поэтому сердце у ребенка или подростка, как в условиях покоя, так и при мышечной деятельности работает несколько напряженнее, чем у взрослых.

Сосудистая система и артериальное давление. По мере развития детей увеличивается просвет кровеносных сосудов. В результате повышается объем циркулирующей крови и создаются условия для лучшего кровоснабжения тканей, работающих органов кислородом и удаления продуктов распада [23; 24; 26]. Наряду с расширением просвета



сосудов образуются новые кровеносные сосуды. Это особенно характерно для детей, активно занимающихся физической культурой и спортом. Формирование новых сосудов и их коллатералей в результате регулярной мышечной деятельности приводит к усилению периферического кровообращения [23].

У детей систолическое давление во время физических упражнений увеличивается значительно меньше, чем у взрослых [23–25].

Возрастные изменения ССС отражают особенности регуляции кровообращения растущего организма. В младшем школьном возрасте заметно преобладают симпатические влияния [5; 27; 28]. По мере развития организма это преобладание становится менее выраженным на фоне усиления влияния блуждающего нерва. В результате организуется такое взаимодействие симпатических и парасимпатических влияний, которое обеспечивает эффективную деятельность сердечно-сосудистой системы как в покое, так и при напряженных физических упражнениях [23; 24; 26].

Влияние накопления цезия-137 на функциональное состояние сердечно-сосудистой системы детей.

Исследования Ю.И. Бандажевского и К.Я. Булановой показали, что ионизирующие излучения в малых дозах также можно отнести к факторам риска, входящим в общий комплекс вероятностных неблагоприятных воздействий на живой организм, поскольку радиационный синдром ускоренного старения является одним из наиболее выраженных последствий действия ионизирующей радиации на организм. Оказалось, что не лучевая болезнь, а повышение уровня общих соматических заболеваний явилось причиной роста смертности среди населения, подвергнутого воздействию ионизирующих излучений в малых дозах [13; 14].

Статистические данные свидетельствуют, что на первом месте среди причин смертности стоят заболевания сердечно-сосудистой системы. Ряд авторов (К.Я. Буланова, Л.М. Лобанок, Е.Ф. Конопля) подтверждают высокую вероятность развития нарушений ССС у пациентов, подвергнутого воздействию ионизирующей радиации в терапевтических целях. Результаты их исследования свидетельствуют, что частота сердечно-сосудистых заболеваний у ликвидаторов Чернобыльской катастрофы значительно выше, чем у остального населения [13; 14; 30].

В исследованиях, проведенных профессором Ю.И. Бандажевским, затрагивалась тема инкорпорированного в организм радиоцезия и эффектов, связанных с ним [14; 15]. Электрокардиографическое обследование детей разного возраста (от 14 дней до 14 лет) проживающих в загрязненных радионуклидами районах (Гомельская область – 1–5 Ки/км² по плотности загрязнения ¹³⁷Cs), показало высокую частоту нарушений сердечной деятельности (от 55,9% до 98,1%), формирование которых происходило, в основном, за счет нарушений проводимости сердечного импульса в виде неполных блокад правой ножки пучка Гисса, нарушений окислительно-восстановительных процессов миокарда и нарушений автоматизма синусового узла. Выраженность повреждения зависит от количества инкорпорированного в организм и указанные органы радиоцезия. Чем интенсивнее происходит этот процесс, тем большую степень повреждения можно констатировать [14; 15].

Радиотоксическому воздействию, как правило, подвергается несколько органов одновременно, вследствие чего возникает эффект метаболической дисфункции [14; 15]. Автор подчеркивает, что увеличивающееся количество радиоцезия вторгается в метаболические процессы, повреждает мембранные структуры клетки [14; 15].



Структурные изменения миокарда в условиях прогрессивного накопления цезия-137 свидетельствуют о его токсическом воздействии, при этом страдает энергетическая система и, в частности, митохондрии. В этих органеллах происходят глубокие (а по мере увеличения содержания радиоцезия – и необратимые) изменения, приводящие к некробиотическим процессам в клетке [14; 15]. Отражением энергетического неблагополучия является также подавление активности креатинфосфокиназы [14; 15].

Профессор К.Я. Буланова не отрицает возможную триггерную роль ионизирующих излучений в возникновении сердечно-сосудистых заболеваний. В своей монографии «Радиация и Чернобыль: кардиомиоциты и регуляция их функций» она отмечает, что старение (физиологическое или ускоренное действием факторов риска) является основой для повышения вероятности развития сердечно-сосудистых заболеваний [13].

По мнению Ю.И. Бандажевского, у детей значительные патологические изменения со стороны органов и систем регистрируются при инкорпорации радиоцезия свыше 50 Бк/кг, в то же время метаболический дискомфорт в отдельных системах, прежде всего в миокарде, отмечается при инкорпорации цезия-137 в 20 Бк/кг [14; 15].

Поражение сердечно-сосудистой системы в детском возрасте проявляется синдромом вегетативной дисфункции, функциональными кардиомиопатиями, изменениями ЭКГ в виде различных нарушений ритма. На основании результатов проводимых исследований аутопсии миокарда людей, умерших внезапной смертью, Ю.И. Бандажевский и другие отмечали высокий уровень цезия-137 в данном органе [14, 15].

Под руководством Юрия Ивановича были проведены исследования функционального состояния ССС детей в возрасте от 7 до 17 лет, постоянно проживающих в загрязненной сельской местности Гомельской области [16]. В результате мониторинга были получены данные о том, что дети из загрязненных районов имеют изменения функционального состояния ССС, которые выражаются наличием жалоб, систолического шума функционального характера на верхушке сердца, повышенного АД при физической нагрузке (10 приседаний за 20 секунд на полу), электрокардиографических изменений картины сердца. Отмечалось достоверное увеличение гипертонического типа сосудистой реакции на физическую нагрузку у детей первой (25,8%) и второй (50%) групп по сравнению с группой контроля (9,1%). В первую группу вошел 31 ребенок со средней удельной активностью цезия-137 в организме $38 \pm 2,4$ Бк/кг, во вторую группу – 30 детей с удельной активностью цезия-137 – $122 \pm 18,5$ Бк/кг. Контрольную группу составили 33 ребенка, в организме которых не содержался цезий-137. Группы достоверно не различались по возрасту детей и половому составу.

Нормальную ЭКГ имели 4 ребенка (12,9%) первой, 2 ребенка (6,6%) второй основных групп и 16 (48,5%) контрольной группы. Была выявлена зависимость ЭКГ нарушений от уровня средней удельной активности ^{137}Cs в организме детей. Данные изменения, в основном, представлены нарушением проводимости (неполная блокада правой ножки пучка Гиса) и сочетанными изменениями (нарушение метаболических процессов в миокарде и неполной блокадой правой ножки пучка Гиса) [16].

В ходе выполнения магистерской диссертационной работы Д.А. Залетенко под моим руководством были предприняты комплексные исследования динамики адаптационного потенциала сердечно-сосудистой системы учеников четвертых классов СШ № 2 г. Лунинца. Полученные экспериментальные данные составляют совокупность новых оригинальных фактов в области влияния радионуклидного загрязнения местности на регуляцию деятельности кардиореспираторной системы у младших школьников 9–10 лет на протяжении учебного года. Так, анализ адаптационного потенциала сер-



дечно-сосудистой системы, а также проб Штанге и Генчи показал, что происходит достоверное снижение резервных и адаптационных возможностей кардиореспираторной системы детей 9–10 лет преимущественно на втором этапе исследования (в период зимних заболеваний). Установлена связь между адаптационным потенциалом сердечно-сосудистой системы и уровнем удельной активности цезия-137 в контрольной и экспериментальной группе девочек 9–10 лет, отнесенных к основной группе здоровья на первом этапе исследования, при этом у мальчиков и в экспериментальных группах детей такая связь отсутствовала. В контрольной группе детей 9–10 лет установлена взаимосвязь между временем задержки дыхания на вдохе и выдохе, и уровнем удельной активности цезия-137. После выполнения контрольного физического упражнения на втором этапе работы наблюдалось снижение числа восстановившихся детей 9–10 лет в контрольной группе на 3,9% и увеличение на 2,2% в экспериментальной группе. На третьем этапе обследования количество восстановившихся младшеклассников 9–10 лет в контрольной группе практически достигло значений первого этапа, а в экспериментальной группе осталось неизменным по сравнению с вторым этапом исследования [31–35].

Заклучение

Таким образом, многочисленные данные отечественных и зарубежных физиологов, а также результаты наших исследований указывают, что основным индикатором адаптивных реакций организма человека и коррекции его адаптационных возможностей в условиях низкоинтенсивного радиоактивного облучения остается деятельность сердечно-сосудистой системы. Своевременное выявление отклонений адаптационного потенциала сердечно-сосудистой системы от физиологической нормы должно приводить к своевременным её коррекциям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криволапчук, И.А. Кондиционные двигательные способности и неспецифическая деятельность детей младшего школьного возраста на различные виды нагрузок : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.13 / И.А. Криволапчук ; Ин-т возраст. физиол. – М., 2005. – С. 10–13.
2. Мишкова, Т.А. Морфофункциональные особенности и адаптационные возможности современной студенческой молодежи в связи с оценкой физического развития : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.03.02 / Т.А. Мишкова ; МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 2010. – 22 с.
3. Федоров, Б.М. Стресс и система кровообращения / Б.М. Федоров. – М. : Медицина, 1990. – 320 с.
4. Гаврилова, И.Н. Вегетативные проявления реакций срочной и долговременной адаптации студенток к условиям образовательной деятельности : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.13 / И.Н. Гаврилова ; Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2008. – С. 3–6.
5. Тупицын, И.О. Возрастная динамика и адаптационные изменения сердечно-сосудистой системы школьников / И.О. Тупицын. – М. : Педагогика, 1985. – 88 с.
6. Уилмор, Д. Физиология спорта и двигательной активности / Д. Уилмор, Д. Костилл. – Киев : Олимп. лит., 1997. – 504 с.
7. Саваневский, Н.К. Регуляция ритма сердца у девушек, долго проживающих на радиационно-загрязненной местности, при выполнении статической нагрузки /



Н.К. Саваневский, Ю.Н. Легошко // Функциональные изменения в организме при мышечной деятельности : тез. докл. студенч. межфак. науч.-практ. конф., Брест, 28 мая 2010 г. / редкол.: М.В. Головач [и др.]. – Брест : БрГУ имени А.С. Пушкина, 2010. – С. 50–52.

8. Савченко, В.К. Экология чернобыльской катастрофы / В.К. Савченко. Минск : Беларус. навука, 1997. – 224 с.

9. Холодов, Ж.К. Теория и методика физического воспитания и спорта : учеб. пособие для студентов вузов физ. культуры / Ж.К. Холодов, В.С. Кузнецов. – 6-е изд. – М. : Академия, 2008. – С. 187–183.

10. 20 лет после чернобыльской катастрофы: последствия в Республике Беларусь и их преодоление : материалы нац. докл., Минск, 19–21 апр. 2006 г. / Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Респ. Беларусь ; редкол.: В.Е. Шевчук (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2006. – 112 с.

11. Четверть века после чернобыльской катастрофы : итоги и перспективы развития : материалы нац. докл., Минск, 26 апр. 2011 г. / Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Ми-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь ; под общ. ред. В.В. Ржеуцкой. – Минск, 2011. – 90 с.

12. Меерсон, Ф.З. Адаптация к стрессорным ситуациям и физическим нагрузкам / Ф.З. Меерсон, М.Г. Пшенникова. – М. : Медицина, 1988. – С. 5–17.

13. Буланова, К.Я. Радиация и Чернобыль : Кардиомициты и регуляция их функции / К.Я. Буланова, Л.М. Лобанок, Е.Ф. Конопля. – Гомель : РНИУП, 2008. – 132 с.

14. Бандажевский, Ю.И. Патологические процессы в организме при инкорпорации радионуклидов / Ю.И. Бандажевский. – Минск : Белрад, 2002. – 140 с.

15. Бандажевский, Ю. Беларусь до и после Чернобыля: радиоэкология, демографические и медицинские аспекты / Ю. Бандажевский // Чернобыль [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : <http://www.jeanmicheljacquem.in.com/index.php?link=20005h&PHPSESSI>. – Дата доступа : 10.10.2010.

16. Бандажевский, Ю.И. Функциональное состояние сердечно-сосудистой системы у детей, проживающих на загрязненных радионуклидами территориях / Ю.И. Бандажевский [и др.] // Радиационный мониторинг жителей и их продуктов питания в Чернобыльской зоне Беларуси : информ. бюл. № 24 / В.Б. Нестеренко. – Минск, 2003. – С. 36–40.

17. Фомин, Н. Адаптация: общебиологические и психофизиологические основы / Н. Фомин // Научный российский портал [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://www.teoriya.ru/books/index.php?p=5&oby=0&ot=0>. – Дата доступа : 03.09.2011.

18. Баевский, Р.М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем / Р.М. Баевский [и др.] // Вестн. аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–77.

19. Об утверждении перечня населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, и признании утратившими силу некоторых постановлений Совета Министров Республики Беларусь : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 1 февр. 2010 г., № 132 // Эталон – Беларусь [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://www.ncpi.gov.by>. – Дата доступа : 05.09.2011.

20. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС // Ми-во по чрезвычайным ситуациям РБ [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://www.chernobyl.gov.by>. – Дата доступа : 05.09.2011.



21. Информационный портал // Последствие радиации на организм [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://www.chernobyl.by/research/74–medicinskie–posledstvija.html>. – Дата доступа : 05.09.2011.
23. Коц, Я.М. Спортивная физиология : учеб. пособие / Я.М. Коц. – М. : Физкультура и спорт, 1986. – С. 100–110.
24. Фомин, Н.А. Физиологические основы двигательной активности / Н.А. Фомин, Ю.Н. Вавихов. – М. : Физкультура и спорт, 1991. – 224 с.
25. Макаров, Г.А. Спортивная медицина / Г.А. Макаров. – М. : Советский спорт, 2002. – С. 175–207.
26. Дубровский, В.И. Лечебная физкультура и врачебный контроль / В.И. Дубровский. – М. : Мед. информ. агентство, 2006. – С. 100–102.
27. Кмить, Г.В. Краткосрочная адаптация сократительной функции миокарда к физической нагрузке у детей 8 лет / Г.В. Кмить // Новые исследования. – 2002. – № 27. – С. 95–96.
28. Догадкина, С.Б. Особенности вегетативной регуляции сердечного ритма у детей 8 лет / С.Б. Догадкина // Новые исследования. – 2002. – № 27. – С. 100–103.
29. Думбай, В.Н. Физиологические основы валеологии труда и спорта : учеб. пособие / В.Н. Думбай [и др.] ; под ред. Г.А. Кураева. – Ростов н/Д : Изд-во УНИИ валеологии РГУ, 2002. – С. 120–121.
30. Конопля, Е.Ф. Анализ кардиомиоцитов в разные сроки после острого облучения / Е.Ф. Конопля [и др.] // Медико-биологические последствия чернобыльской катастрофы : материалы междунар. науч. конф., Гомель, 15–16 окт. 2009 г. / Ин-т радиологии ; редкол.: Е.Ф. Конопля [и др.]. – Гомель, 2009. – С. 153–156.
31. Головач, М.В. Мониторинг уровня здоровья школьников г. Лунина и г. Бреста по показателю адаптационного потенциала сердечно–сосудистой системы / М.В. Головач, Д.А. Залетенко // Биомониторинг состояния природной среды Полесья : материалы междунар. науч.-практ. конф., Брест, 10–11 нояб. 2011 г. / гл. ред. А.Н. Тарасюк. – Брест : Альтернатива, 2011. – С. 157–160.
32. Залетенко, Д.А. Функциональные возможности дыхательной системы детей младшего школьного возраста средней школы № 2 г. Лунина / Д.А. Залетенко, Н.А. Залетенко // Природа, человек и экология : сб. материалов II Межуниверситет. Студенч. науч.-практ. конф.; Брест, 28 апр. 2011 г. / Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина ; под общ. ред. Л.Н. Усачевой. – Брест : БрГУ, 2011. – С. 44–45.
33. Головач, М.В. Определение адаптационного потенциала сердечно–сосудистой системы детей школьного возраста, проживающих на территории радионуклидного загрязнения / М.В. Головач, Д.А. Залетенко // Научный потенциал молодежи – будущему Беларуси : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Пинск, 31 марта 2011 г. / УО «ПолесГУ». – Пинск : ПолесГУ, 2011 – С. 215–216.
34. Залетенко, Д.А. Анализ динамики адаптационного потенциала сердечно–сосудистой системы младших школьников, проживающих на территории радионуклидного загрязнения / Д.А. Залетенко, Н.А. Залетенко // Морфофизиологическая адаптация организма человека в современных условиях окружающей среды : тез. докл. студенч. межфак. науч.-практ. конф., Брест, 25 марта 2011 г. [Электронный ресурс] / редкол.: М.В. Головач [и др.]. – Брест : БрГУ имени А.С. Пушкина, 2011. – С. 25–26. – Режим доступа : <http://www.brsu.by>. – Дата доступа : 05.09.2011.
35. Залетенко, Д.А. Определение адаптационного потенциала сердечно–сосудистой системы у детей школьного возраста : в 4 ч. / Д.А. Залетенко // Научный по-



тенциал молодежи – будущему Беларуси : тез. до кн. IV междунар. молодеж. науч.-практ. конф., Пинск, 9 апр. 2010 г. / Полес. гос. ун-т ; редкол.: К.К. Шебеко (пред.) [и др.]. – Пинск: ПолесГУ, 2010. – Ч. 6. – С. 249.

M.V. Halavach. Adaptation The Possibility Of Cardiovascular System Students 9-10 Years Living In The Area Of Radionuclide Contamination

The analysis of the literature on the impact of radionuclide contamination on the adaptive capacity of the cardiorespiratory system in children 9-10 years old at the various stages of the academic year. Numerous data of domestic and foreign physiologists, as well as the results of our studies indicate that the main indicator of the adaptive responses of the human body and the correction of its adaptive capacity in low-intensity radiation exposure remains the cardiovascular system. Timely detection of deviations adaptive capacity of the cardiovascular system of physiological norms should lead to its timely correction.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 12.10.2013



УДК 581. 821

М.П. Жигар, Н.М. Матусевич

СТРОЕНИЕ ЧЕРЕШКОВ КУСТАРНИКОВЫХ SPIRAEOIDEAE КАК ТАКСОНОМИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК

Приводятся признаки анатомического строения черешков листьев *Spiraea Van-Houttei*, *Spiraea salicifolia*, *Physocarpus opulifolius*, *Sorbaria sorbifolia*, которые можно рассматривать как диагностические. Анализируются некоторые системы *Rosaceae*. Признаки анатомического строения черешков, наряду с другими признаками (строение цветков, плодов, анатомическое строение коры и древесины и др.), могут быть использованы для решения спорных вопросов систематики растений.

Строение черешка давно используется в качестве систематического признака, и в имеющихся публикациях, посвященных изучению анатомии черешков, показано, что этот признак является довольно надежным [1–3]. Это связано с тем, что анатомическое строение черешка является достаточно стойким признаком. Вот почему, изучив анатомическое строение черешка, можно уточнить положение спорных родов в пределах того или иного семейства. Этот признак приобретает еще больший вес в силу того, что он существенно не меняется при изменении экологических условий.

Однако работы, посвященные сравнительно-анатомическому изучению черешков в семействе *Rosaceae*, весьма малочисленны. Вместе с тем, при выяснении систематического положения, эволюции растений исследователи, наряду с другими признаками (строение цветков, плодов, коры стебля, число хромосом и т.д.) принимают во внимание и структуру листового черешка [1, 3].

Объекты и методы исследования

Объектами исследования явились черешки четырех видов кустарниковых растений, относящихся к трем родам подсемейства *Spiraeoideae* семейства *Rosaceae*: спирея Вангутта (*Spiraea Van-Houttei*), спирея иволистная (*Spiraea salicifolia* L.), пузыреплодник калинолистный (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim.), рябинник рябинолистный (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Br.).

Листовые черешки были собраны с листьев однолетних побегов, располагающихся в средней части кустарника. Для изучения брали черешки листьев, расположенных на уровне груди исследователя, т.е. листьев одного яруса. Образцы были взяты во второй половине сентября и помещены в 96%-й раствор спирта, где они находились в течение 3 недель. Часть материала (виды спиреи и пузыреплодник калинолистный) была собрана с растений, растущих на территории Агробиологического центра Брестского госуниверситета, а образцы рябинника рябинолистного были взяты с экземпляра, произрастающего в деревне Томашовка Брестского района.

С использованием лезвия бритвы и сердцевины бузины были сделаны тонкие поперечные срезы через среднюю часть черешка, которые затем окрашивали сафранином и нильским синим, после чего помещали на предметное стекло в каплю глицерина и накрывали покровным стеклом.

Исследования препаратов проводили при помощи светового микроскопа Биолам Р-15. Для микроскопических измерений использовали винтовой окуляр-микрометр МОВ-1-15. Полученные данные подвергали математической обработке.



Результаты исследования

На поперечном срезе черешок пузыреплодника калинолистного (*Physocarpus opulifolius*) имеет слегка угловатую форму с желобчатой выемкой на адаксиальной его стороне. Снаружи он покрыт эпидермой, состоящей из одного слоя плотно соединенных между собой клеток, несколько вытянутых в тангентальном направлении. Внешняя стенка эпидермальных клеток более утолщенная, на ее поверхности располагается слой кутикулы. Эта ткань хорошо отличается от ниже лежащих тканей.

Глубже располагается в виде двух сплошных слоев клеток механическая ткань колленхима с довольно сильно утолщенными оболочками в углах клеток, то есть она уголкового типа. Эта ткань достигает $65,43 \pm 0,12$ мкм.

Коровая паренхима, лежащая под колленхимой, сложена живыми паренхимными тонкостенными клетками изодиаметрической формы, с небольшими межклетниками. В ее клетках отчетливо просматриваются включения кристаллов щавелевокислого кальция, представленные друзами. Распределены они в ткани равномерно.

В черешке располагается незамкнутая (дискретный тип) проводящая система в виде трех проводящих пучков, из которых центральный – самый крупный. Все пучки коллатерального типа, располагаются по дуге, состоят из ксилемы и флоэмы и армированы механической тканью склеренхимой. Степень развития тканей в центральном пучке составляет: ксилемы – $37,52 \pm 0,15$ мкм, флоэмы – $25,63 \pm 0,08$ мкм, в более мелких пучках величина слоя ксилемы $15,41 \pm 0,14$ мкм, флоэмы – $08,65 \pm 0,11$ мкм. Склеренхима в виде «шапки» располагается над флоэмой. Пучки разобщены массивами основной паренхимы, клетки которой тождественны коровой и сердцевинной паренхиме. У пузыреплодника, следовательно, не закладывается сплошного прокамбиального кольца, и прокамбий представлен отдельными тяжами, расположенными по кругу.

Сердцевина представлена небольшим числом слоев паренхимных клеток. В некоторых из них содержатся кристаллы оксалата кальция в виде друз.

Черешки спиреи Вангутта (*Spiraea Van-Houttei*) и спиреи иволистной (*Spiraea salicifolia*) в поперечном сечении имеют округлую форму, в средних его участках у первого вида слегка уплощенную с адаксиальной стороны, а в нижней части черешок имеет два крыловидных выроста; у спиреи иволистной черешок имеет желобчатую выемку на адаксиальной стороне.

Снаружи черешок покрыт эпидермой, состоящей из одного слоя плотно соединенных между собой клеток, имеющих несколько вытянутую в тангентальном направлении форму. Наружные тангентальные клеточные стенки этой ткани слегка утолщены, на их поверхности располагается кутикула. Субэпидермально располагаются два слоя клеток колленхимы. У спиреи Вангутта эта ткань пластинчатого типа, с утолщенными тангенциальными стенками, у спиреи иволистной утолщены оболочки в углах клеток, т.е. она уголкового типа. Толщина этой ткани в нижней части черешка составляет $66,36 \pm 0,12$ мкм у спиреи Вангутта, $71,34 \pm 0,1$ мкм у спиреи иволистной.

Глубже располагается основная ткань, занимающая больший объем по сравнению с другими тканями. Это – коровая паренхима. Клетки ее живые, тонкостенные, в поперечном сечении у обоих видов спиреи они имеют изодиаметрическую форму. Сложение ткани рыхлое. По сравнению с другими тканями коровая паренхима составляет большую часть черешка, достигая у спиреи Вангутта $122,44 \pm 0,1$ мкм, у спиреи иволистной – $134,29 \pm 0,13$ мкм. У спиреи иволистной содержимое некоторых ее клеток окрашено за счет содержания в них дубильных веществ, т.е. она гетерогенного типа.



Центральное место в черешке обоих видов спирей занимает проводящий пучок, представленный в единственном числе. Он армирован механической тканью склеренхимой, которая сложена двумя слоями клеток, располагающихся над флоэмой и по бокам ксилемы. Проводящие пучки закрытого коллатерального типа.

Под ксилемой располагается сердцевина, состоящая из паренхимных клеток неодинаковых размеров. Часть ее клеток у обоих видов содержит танины, и эти клетки отличаются от других темным окрашиванием внутреннего содержимого. У спирей иволистой дубильные вещества отмечены в клетках нижних участков черешка, в верхней и средней их части они не обнаружены.

Черешок рябинника рябинолистного (*Sorbaria sorbifolia*) в верхней и средней части имеет ребристую форму, а в нижней части – желобчатую. Снаружи черешок покрыт эпидермой, имеющей строение, сходное с предыдущими видами Спирейных.

Располагающаяся ниже механическая ткань колленхима в большинстве своем углового типа, но встречаются и клетки, в которых происходит утолщение тангентальных стенок, т.е. присутствует и пластинчатая колленхима. Толщина слоя этой ткани в черешке рябинника рябинолистного составляет $66, 77 \pm 0,14$ мкм, сложена она двумя слоями клеток.

Ниже колленхимы развита коровая паренхима. Клетки ее живые, тонкостенные, изодиаметрической формы, имеются небольшие межклетники. Степень ее развития – $121,11 \pm 0,10$ мкм. Некоторые клетки в ее составе окрашены за счет содержания в них дубильных веществ, т.е. она гетерогенная по слагающим ее клеткам. Кроме того, в отдельных клетках ее содержатся друзы оксалата кальция, при этом в верхних участках черешка их содержится больше.

На поперечном срезе видно, что черешок рябинника рябинолистного имеет незамкнутую проводящую систему (дискретный тип), состоящую из пяти отдельных пучков, разобщенных участками основной паренхимы, клетки которой тождественны коровой и сердцевинной паренхиме, но имеют несколько меньшие размеры. Из пяти пучков один более крупный и занимает центральное место, остальные четыре более мелкие. Пучки закрытого коллатерального типа. Каждый пучок армирован механической тканью склеренхимой, представленной 2–5 слоями клеток. При этом у крупного пучка слой склеренхимных волокон располагается над флоэмой и по бокам ксилемы, а мелкие пучки склеренхима окружает со всех сторон, образуя замкнутое кольцо клеток.

Расположенная ниже ксилемы сердцевина имеет в своем составе 7–10 слоев паренхимных клеток. Часть из них содержит дубильные вещества, поэтому отличаются от других клеток темным окрашиванием внутреннего содержимого.

Заключение

Проведенное изучение анатомического строения черешков некоторых Спирейных показало, что в их структуре имеются как общие, так и отличительные признаки. Сходными признаками являются тканевый состав и топография тканей черешков. Так, черешки всех изученных видов состоят, начиная с периферии, из эпидермы, колленхимы, коровой паренхимы, проводящих закрытых коллатеральных пучков, армированных склеренхимой, и сердцевины.

Много сходных признаков нами выявлено у видов рода *Spiraea*. Их черешки содержат только по одному проводящему пучку; коровая паренхима у них гетерогенная. Сходной является и форма черешков в поперечном сечении – округлая, с уплощенной адаксиальной стороной. У видов спирей не выявлены нами кристаллы оксалата каль-



ция. Склеренхимная обкладка, армирующая проводящий пучок, состоит из двух слоев клеток и имеет очертания дуги.

Отличительными признаками у черешков изученных Спирей являются: наличие у *Spiraea Van-Houttei* двух крыловидных выростов, тип колленхимы (у спиреи Вангутта она пластинчатая, у спиреи иволистной – уголкового). Эти признаки отличия в структуре черешков, на наш взгляд, свидетельствуют о видовой специфичности.

Черешок *Physocarpus opulifolius* отличается от черешка спирей наличием 3 проводящих пучков, один из которых более крупный, два других – более мелкие. Пучки располагаются по дуге. Все три пучка армированы склеренхимой, которая в виде «шапочки» размещена над флоэмой. Колленхима, лежащая под эпидермой, у пузыреплодника калинолистного двуслойная, уголкового типа. Коровая паренхима, в отличие от видов спирей, гомогенная, сложена не отличающимися друг от друга клетками с небольшими межклетниками. В них имеются кристаллы оксалата кальция в виде друз. При этом в нижней трети черешка кристаллов больше, чем в верхнем и среднем его участках.

Форма черешка пузыреплодника калинолистного слегка угловатая, с желобчатой выемкой на адаксиальной стороне, это хорошо просматривается на поперечном срезе черешка.

У *Sorbaria sorbifolia* отличительными признаками строения черешка являются: наличие уголкового, местами пластинчатой колленхимы, сложенной двумя слоями клеток; гетерогенная коровая паренхима, у которой некоторые клетки – таннинсодержащие, а в некоторых имеются кристаллы оксалата кальция в виде друз; развитие пяти проводящих пучков, из которых средний более крупных размеров, а четыре – более мелкие. При этом у крупного пучка «шапка» склеренхимных волокон располагается в виде дуги над флоэмой и по бокам ксилемы, а у мелких пучков склеренхима окружает их со всех сторон, образуя замкнутое кольцо клеток.

Форма черешка у рябинника рябинолистного в нижней его части – желобчатая.

Различия между изученными видами в структуре черешков свидетельствуют, на наш взгляд, о видовой специфичности и дают основание для заключения о разных уровнях их эволюционной продвинутости.

Анализ некоторых систем Розоцветных показывает, что положение родов *Physocarpus* и *Sorbaria* трактуется ботаниками-систематиками неоднозначно. Так, В. Фоке [4] оба эти рода, наряду с родами Спирея и Сибирка, включает в состав трибы *Spiraeae* подсемейства *Spiraeoideae*. Г. Шульце-Менц, А.Л. Тахтаджян в трибу *Spiraeae* включают только роды Спирея и Сибирка. Род *Physocarpus* отнесен ими к трибе *Neillieae*, а род *Sorbaria* они рассматривают в составе трибы *Sorbarieae* [5; 6].

Полученные нами данные по строению черешка показывают, что виды рода *Spiraea* могут быть отнесены к одной трибе *Spiraeae*.

Данные по строению черешка рябинника рябинолистного (*Sorbaria sorbifolia*) не подтверждают систему В. Фоке, но согласуются с системами Г. Шульце-Менца и А.Л. Тахтаджяна, которые выделили этот род в отдельную трибу *Sorbarieae* [5; 6].

Род *Physocarpus* включен Г. Шульце-Менцом и А.Л. Тахтаджяном в трибу *Neillieae*. Наши исследования согласуются с системами этих авторов и не подтверждают систему В. Фоке, который отнес этот род к трибе *Spiraeae* [4].

Таким образом, признаки анатомической структуры черешков листьев можно использовать, наряду с другими признаками (строение цветков, плодов, анатомия коры, древесины, хромосомные числа), для решения спорных вопросов систематики растений.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубкова, И.Г. Сравнительное морфолого-анатомическое изучение черешка и эпидермы листа у представителей сем. Vitaceae Juss / И.Г. Зубкова // Вопросы сравнительной морфологии семенных растений. – Л. : Наука, 1975. – С. 25–49.
2. Лучков, А.И. К морфологической характеристике черешков листьев представителей рода Acer L / А.И. Лучков, Т.Ф. Дерюгина // Ботаника : сб. науч. труд. – Минск : Навука і тэхніка, 1990. – Вып. 30. – С. 192–196.
3. Халимов, И.И. Сравнительно-анатомическое исследование черешка представителей рода Crambe (Brassicaceae) в связи с его систематикой и филогенией / И.И. Халимов, В.И. Трифионов // Ботанический журнал. – 1992. – Т. 77, № 1. – С. 33–44.
4. Focke, W.O. Rosaceae / A. Engler, K. Prantl. Die natürlichen Pflanzenfamilien. – Leipzig, 1894. – S. 3–16.
5. Schulze, M. Rosaceae / A. Engler. Syllabus der Pflanzenfamilien. – Bd. 2. – S. 209–218.
6. Takhtajan, A. Diversity and classification of flowering plants / A. Takhtajan. – New York, 1997. – 290 s.

M.P. Zhigar, N.M. Matusevich As Petioles Of Shrubby Spiraeoideae Taxonomic Characters

We give criteria for anatomical petioles *Spiraea Van-Houttei*, *Spiraea salicifolia*, *Physocarpus opulifolius*, *Sorbaria sorbifolia*, which can be regarded as diagnostic. Analyzes some of Rosaceae. Signs of the anatomical structure of stems, along with other features (structure of flowers, fruits, anatomy of the bark and wood, etc.) can be used to solve problems of systematics of plants.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 11.06.2013



УДК 372.8:57

И.А. Мартысюк

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПОНЯТИЙ И НЕОБХОДИМОСТЬ ИХ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ В КУРСЕ БОТАНИКИ

В статье обоснована необходимость параллельного формирования экологических и эволюционных понятий в курсе ботаники седьмого класса. Приведены рекомендации по формированию эколого-эволюционных понятий при изучении тем: «Основные отделы растений», «Бактерии», «Грибы», «Лишайники».

Введение

Обращение к истории экологии позволяет установить её связи с эволюционным учением, которые в преподавании школьного курса прослеживаются весьма туманно. В сознании учащихся формируются две независимые группы понятий – эволюционные и экологические, которые сосуществуют, но не взаимодействуют. Некоторым оправданием сложившегося положения является то, что современная эволюционная теория ещё только приступает к синтезу с экологией. На пути такого синтеза уже достигнуты определённые успехи, для развития которых в первую очередь необходимо обеспечить логическую связь экологии и эволюционного учения.

Экология и современная эволюционная теория тесно взаимодействуют и находятся в органическом единстве, которое было воплощено уже в учении Ч. Дарвина. По сути дела каждый эволюционный фактор, обоснованный с точки зрения классической эволюционной теории, имеет экологические предпосылки. Непосредственное влияние экологических факторов всегда оказывало воздействие и на такое эволюционное явление, как изоляция, которая во многих случаях вызвана влиянием окружающей среды.

Идеи эволюционного учения как бы придают новое веяние экологии, помогают ставить и решать проблемы эволюции как отдельных видов растений, так и природных фитоценозов. Каждый конкретный фитоценоз, как и произрастающая в нём ценопопуляция, является ареной и регулятором эволюционного процесса. Популяционный уровень организации живого – перекрёсток экологии и эволюции, ибо каждая природная популяция представляет собой объект исследования двух этих научных дисциплин, изучающих совокупности особей конкретного вида, обитающих в определённых экологических условиях.

Приступая к преподаванию любой школьной дисциплины, необходимо учитывать, что способствует пониманию теоретических знаний: это чёткая логическая структура информации, мысленное воспроизведение процессов, становление абстракций и понятий [1]. Известный психолог В.В. Давыдов провёл обширное теоретическое и экспериментальное исследование, в ходе которого показал доступность для школьников понятий и потребность в них [2].

Очень значимыми биологическими понятиями являются экологические и эволюционные, формирование и развитие которых должно осуществляться на протяжении изучения всего курса биологии.

Б.Д. Комиссаров отмечает, что пока курсы средней школы насыщены лишь отдельными сведениями по аутэкологии, а информация о таксонах лишь выстроена в фи-



логенетической последовательности вне рамок понятия эволюция [3]. В работах современных учёных и методистов указывается на огромное значение формирования экологических и эволюционных понятий у учеников среднего школьного возраста. Только на уровне эволюционной теории можно говорить о последовательном, научном познании закономерностей развития органического мира.

Генетическая связь экологических и эволюционных процессов, протекающих в природе, была установлена в результате накопления знаний об эволюции и экологии живых организмов. Постепенно стало формироваться самостоятельное научное направление – эволюционная экология, задача которой – исследование основных закономерностей эволюции средствами экологии и изучение собственно экологических закономерностей эволюционного процесса.

Важным этапом в разработке проблем эволюционной экологии был выход книги С.С. Шварца «Экологические закономерности эволюции», где автор указывает на то, что любой современный вид животных или растений прошёл сложный и длительный путь развития, движущая сила которого – приспособления к изменяющимся условиям среды [4].

В последние десятилетия в биологии наблюдается тенденция к синтезу эволюционного учения и экологии при преподавании биологических дисциплин. Эволюционное учение и экология обеспечивают понимание целостности природы, составляющее научную основу рациональной деятельности человека в биосфере, способствует выходу биологического сознания за рамки типично эмпирической конкретности [5, с 86].

Эволюционные и экологические понятия тесно связаны друг с другом уже на стадии формирования. Синтез эволюционного учения и экологии позволяет рассмотреть фактическое содержание курса биологии одновременно в свете организации и эволюции жизни.

Взаимосвязь экологических и эволюционных понятий в курсе ботаники

Изучение систематического курса биологии в средней школе начинается с ботаники, что особенно повышает значение этого предмета в идейной и общеобразовательной подготовке учащихся. Биологические понятия, сформированные на ботаническом материале, должны заложить в сознании школьников прочную базу для эффективного усвоения заключительного курса «Общей биологии».

Понимание естественной системы растительного мира невозможно без знаний внешнего и внутреннего строения растений, главнейших физиологических процессов, индивидуального развития. Вместе с тем, ботанические знания не могут считаться полноценными, если они будут ограничены лишь фактическими сведениями о растениях, их строении и жизненных отправлениях. Обучение только тогда приведёт к определённой системе знаний и достигнет мировоззренческих идей, когда учащимися постигается сущность явлений, закономерный характер их развития. С этой целью в процессе обучения ботанике большое значение придаётся усвоению учащимися филогенетических понятий, отражающих общие закономерности исторического развития растительного мира и параллельно с ними экологических понятий.

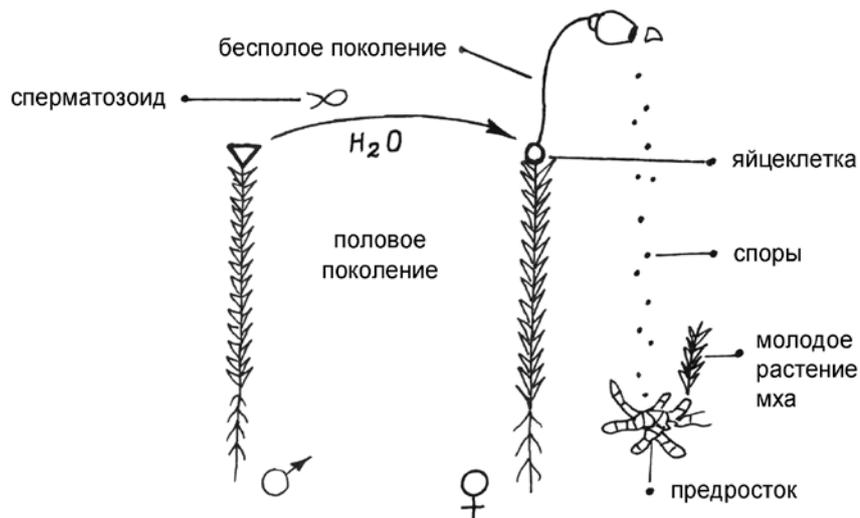
Однако школьный курс ботаники недостаточно насыщен теоретическим материалом для усвоения эволюционных и экологических понятий. Усиление внимания теоретическим вопросам биологии, более раннее включение элементов филогенетических и экологических знаний в содержание учебного материала, несомненно, является положи-



тельным моментом, способствующим усилению пропедевтической направленности этой школьной дисциплины в системе общебиологического образования школьников.

Формирование и развитие экологических и эволюционных понятий при изучении растений совершается в основном при изучении темы «Основные отделы растений». Значение этой большой темы огромно, т.к. здесь ученики не только знакомятся с многообразием растительного мира, но и подходят к пониманию проблем эволюции растительных форм. В данной теме необходимо показать, что адаптации организмов к условиям среды возникали в результате их эволюционного развития.

Ярким примером тому является приспособленность мхов и папоротников к влажным условиям среды. Это обусловлено особенностями их морфологического строения: отсутствием корней у мхов и лишь наличием слабых придаточных корней у папоротников. Однако самой главной причиной приуроченности большинства представителей этих двух отделов растительного мира к обилию влаги является способ их полового размножения, при котором сперматозоиды, имеющие жгутики, могут передвигаться и достигнуть яйцеклеток только в капельно-жидкой среде. Это удачно демонстрируется на уроке с помощью динамического рисунка учителя на доске.



Рисунок

1 – Цикл развития мха

Необыкновенная приспособленность к условиям наземного существования обнаруживается у голосеменных и покрытосеменных растений. Это связано с особенностями их морфологического, анатомического строения, циклами развития. В цикле их развития появляется семя. Появление семени – один из важнейших ароморфозов в эволюции растительного мира. В отличие от споры, семя – многоклеточное, содержит зародыш и запас питательных веществ, сохраняет жизнеспособность при отсутствии влажных условий.

У голо- и покрытосеменных мужские гаметы лишены жгутиков и они передвигаются к женским гаметам не с помощью воды, а вместе с прорастающей пыльцевой трубкой. Процессы опыления и оплодотворения не зависят от наличия воды. Женский гаметофит (семяпочка) не соприкасается непосредственно с воздушной средой. Внутри семяпочки создаются наиболее благоприятные условия, предохраняющие женский га-



метофит от высыхания. В результате происходит упрощение женского гаметофита и архегониев, возникает возможность очень раннего формирования яйцеклетки.

Внутреннее оплодотворение, развитие зародыша внутри семяпочки и появление семени – главные биологические преимущества семенных растений, позволившие им полностью приспособиться к наземным условиям и достигнуть более высокого развития. Успешное завоевание семенными растениями суши связано с редукцией гаметофита при дальнейшем совершенствовании спорофита. Цикл развития голосеменных также хорошо демонстрируется динамическим рисунком учителя на доске.

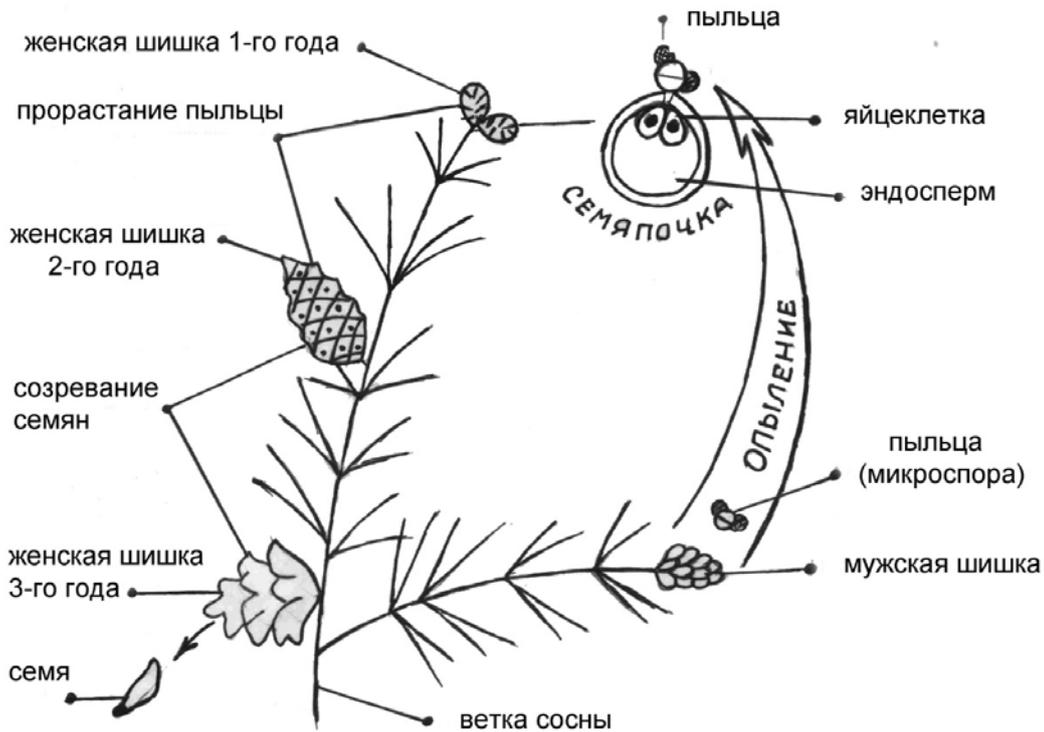


Рисунок 2 – Цикл развития сосны обыкновенной

Покрытосеменные растения оказались наиболее приспособленными к разнообразным условиям существования благодаря высокому уровню организации (наличие цветка; образование плода, облегчающего процесс распространения и расселения покрытосеменных; пластичность вегетативных органов, разнообразие жизненных форм и т.д.). В настоящее время они занимают господствующее положение на Земле, стоят на высшей ступени эволюции в растительном царстве.

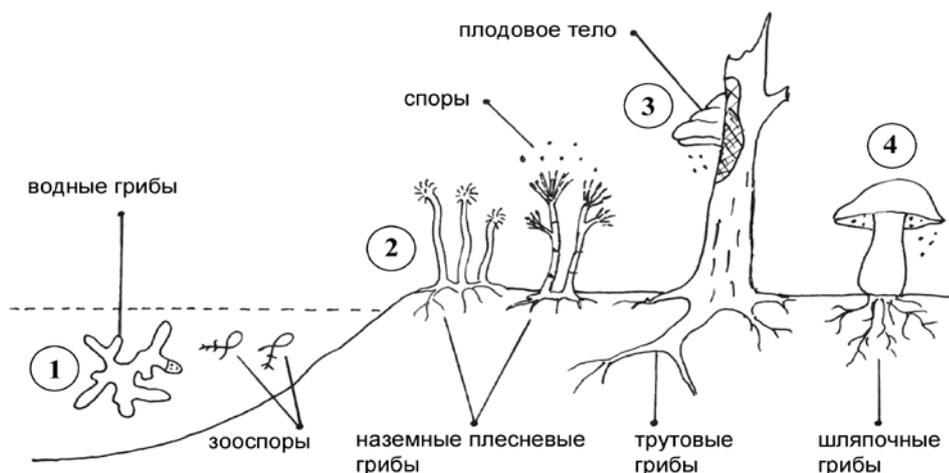


Рисунок 3 – Эволюция грибов

Эволюционное развитие грибов также обусловило их приспособление к разнообразным условиям среды. Например, в воде обитает плесневый гриб сапролегния, формирующий в период размножения двужгутиковые зооспоры. Однако большинство грибов приспособилось к жизни на суше, но при этом они очень влаголюбивы.

В далёком прошлом некоторые грибы и водоросли, обитая по соседству во влажных местах, соприкасались друг с другом. Благодаря тесному соединению гриба и водоросли возник новый, очень устойчивый организм – лишайник. Лишайники могут переносить мороз и засуху, обладают уникальной способностью существовать в таких условиях, где не могут жить другие организмы (скалы, камни, крыши домов, стекло). Их комплексная природа позволяет получать питание даже из воздуха, атмосферных осадков, влаги росы и туманов, оседаемой на слоевище. Гриб, прикрепляющий лишайник к субстрату, предохраняет его от высыхания.

Бактерии – древнейшие организмы на земле. Многие из них живут и питаются за счёт других организмов, которые и являются их средой обитания. Кроме паразитов, среди гетеротрофных бактерий есть и сапрофиты, поселяющиеся на мёртвой органике. Часть бактерий способна к автотрофному типу питания.

Бактерии распространены повсеместно. Благодаря специфическому обмену некоторые группы бактерий способны выживать там, где не может существовать ни один другой организм.

Все указанные выше аспекты должны находить отражение в методике преподавания биологии седьмого класса, так как являются значимыми для понимания закономерностей произрастания и распространения растительных организмов, бактерий, грибов и лишайников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин, Б.Г. Методологический анализ как направление изучения науки / Б.Г. Юдин. – М. : Наука, 1986. – 262 с.
2. Давыдов, В.В. Виды обобщений в обучении / В.В. Давыдов. – М. : Педагогика, 1972. – 424 с.



3. Комиссаров, Б.Д. Методологические проблемы школьного биологического образования / Б.Д. Комиссаров. – М. : Просвещение, 1991. – 160 с.
4. Шварц, С.С. Экологические закономерности эволюции / С.С. Шварц. – М. : Наука, 1980. – 278 с.
5. Ефимов, Ю.И. Эволюционно-экологические тенденции в современном биологическом познании / Ю.И. Ефимов // Биология. – М., 1975. – С.86.

I.A. Martysuk The relationship of ecological and evolutionary concepts and the need for a parallel formation in the course of botany

In the article the necessity of forming a parallel ecological and evolutionary concepts in the course of botany seventh grade. The recommendations for the formation of ecological and evolutionary concepts in the study of topics: "The main parts of plants", "bacteria", "mushrooms", "lichen".

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 15.05.2013



УДК 576.116.12

А.Н. Тарасюк

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ИНДУКЦИЯ РЕКОМБИНАЦИИ И ГЕНЕТИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ ВЫСШИХ ОРГАНИЗМОВ

Рассматривается роль рекомбинации в адаптации высших организмов к меняющимся условиям среды и её значение для селекции. Анализируются данные о влиянии температуры как важнейшего абиотического фактора, на частоту и распределение генетических обменов, характеризуются стадиоспецифичность, сегментоспецифичность и временная зависимость действия температуры на процесс рекомбинации, приводятся гипотезы о механизмах температурной индукции рекомбинаций. Результаты трактуются в свете концепции F- и R-систем и гипотезы о связи приспособленности и рекомбинации.

Рекомбинация играет определяющую роль в эволюции высших организмов, так как является незаменимым источником генотипической изменчивости, обуславливая образование новых комбинаций генов, имеющих различную адаптивную ценность [1; 2]. Не менее важным является значение рекомбинации для селекции. Известный шведский генетик Мюнтцинг справедливо назвал рекомбинацию «краеугольным камнем селекции» [3]. Считается, что в обозримом будущем традиционная селекция, базирующаяся на гибридизации, рекомбинации и отборе, будет основным методом создания новых сортов при решении задач повышения адаптивности растениеводства, его энергоэкономности и природоохранности [4; 5]. Поэтому одной из важнейших задач современной прикладной генетики является разработка методов расширения спектра генотипической изменчивости и получения нетрадиционных рекомбинантов. Определённый интерес в решении этой задачи представляет индуцирование рекомбинаций с помощью различных физических агентов, в том числе и температуры. Эффективность её как рекомбиногена показана в ряде работ [1; 6], а простота и доступность в обращении позволяют без существенных затрат использовать температурные воздействия в селекционных программах. Однако противоречивость имеющихся данных, а зачастую и отсутствие повторяющихся эффектов не позволяют гарантированно применять этот фактор для индуцирования рекомбинаций. Поэтому требуется систематизация данных в области влияния температуры на процесс рекомбинации.

Рассматриваемая проблема представляет не только практический, но и теоретический интерес. Температура относится к числу наиболее значимых (наряду с влагой и светом) абиотических факторов, с которыми живые организмы сталкиваются в течение всего онтогенеза. Ранее считалось, что рекомбинация происходит на основе случайности, а среда выступает только в качестве фактора отбора. В последнее время получены данные, свидетельствующие в пользу существования обратной связи между процессом рекомбинации и средой [7; 8]. В основе баланса при этом лежит принцип взаимосвязи между приспособленностью и рекомбинацией: максимуму индивидуальной приспособленности генотипов соответствуют минимальные частота и спектр рекомбинантов в их потомстве [4]. Дальнейшее детальное изучение обнаруженных закономерностей позволит глубже понять механизмы взаимодействия организм–среда и их роль в эволюции и селекции.

С учётом вышеизложенного, целью данной работы явилась систематизация данных о влиянии температурного фактора на процесс рекомбинации у высших организмов в свете проблемы адаптации к меняющимся условиям среды и для практического использования индуцированных температурой рекомбинаций в селекции.



Рекомбинация – основа генотипических адаптаций

Возникновение генотипических адаптаций возможно лишь в популяциях, обладающих определённым запасом наследственной изменчивости. Как известно, первичным источником наследственной изменчивости являются мутации. Однако они могут играть значимую роль только в адаптации микроорганизмов, т.к. способность распространяться в популяциях с огромной скоростью обеспечивает им достаточный размах изменчивости для эволюции в медленно меняющихся условиях среды [9]. У высших организмов темп размножения значительно ниже, а ценность каждой особи в популяции высока. Кроме того, высокая организованность, сбалансированность и координированность функций и процессов высших организмов приводят к ситуации, когда большинство новых мутаций оказывается вредными [10].

Именно поэтому у растений и животных мутационное давление в столь малой степени определяет эволюционные преобразования, что им можно пренебречь [9]. У высших организмов основным источником генотипической изменчивости становится рекомбинация генов [1; 4; 5; 11]. В связи с этим выдающийся американский генетик-эволюционист Ф. Айала отмечает, что «...большая часть имеющейся в популяциях генетической изменчивости возникает не в результате появляющихся в каждом поколении новых мутаций, а вследствие перетасовки уже накопленных мутаций, происходящей при рекомбинации» [12, с.51]. Тонко сбалансированная система регуляции рекомбинаций обеспечивает возможность сохранения и быстрого высвобождения огромного потенциала генетической изменчивости, что особенно важно для организмов с длительным циклом развития и, в частности, для растений и животных [1]. Считается, что даже временная приостановка мутационного процесса у высших организмов не привела бы к заметному уменьшению изменчивости в течение многих поколений [13].

Таким образом, если у микроорганизмов основным источником генетической вариабельности, обеспечивающей возможность адаптивного изменения нормы реакции, являются мутации, то у растений, животных и других организмов, характеризующихся наличием мейотической системы, эту функцию берут на себя рекомбинации.

Адаптации и генетическая система вида

В традиционных условиях среды максимально приспособленная популяция обычно характеризуется генетической стабильностью [11]. Однако возможность генотипической адаптации в будущем, необходимая для выживания популяции при изменении традиционного размаха варьирования средовых факторов, предполагает наличие определённого запаса вариабельности. Таким образом, имеет место противоречие между приспособленностью организмов к условиям среды в настоящем и перспективной приспособленностью, т.е. подготовленностью к возможным изменениям среды в будущем. Это противоречие разрешается на основе совмещения функций воспроизводства генетической информации и генерирования новой изменчивости в рамках процессов мейоза, формирования гамет и оплодотворения. Оптимальный баланс между наследственной константностью и изменчивостью достигается за счёт функционирования наследственно детерминированных механизмов, определяемых как генетическая система [14]. Генетическая система обладает видовой специфичностью и включает подсистемы, связанные с контролем темпов мутирования, развития и др., наиболее важной из которых является рекомбинационная система, регулирующая высвобождение изменчивости за счёт механизмов мейоза и оплодотворения [15]. Именно рекомбинационная система вносит наибольший вклад в адаптацию организмов, обеспечивая оптимальное со-



отношение между максимальной приспособленностью в настоящем и способностью к изменениям в будущем. Генетическая система служит не только для регулирования соотношения между наследственной константностью и вариабельностью, но и определяет всю совокупность признаков и адаптивных реакций организма, связанных с выживанием [16], т.е. контролирует и модификационную адаптацию. В связи с этим выделяют 2 компонента генетической системы вида: 1) система, определяющая все особенности рекомбинации генов в пределах вида (система популяционной адаптации, R-система); 2) система контроля вегетативного развития и ответных физиологических реакций отдельного организма на изменения среды (система индивидуальной адаптации, F-система) [1, 5].

Таким образом, генетическая система вида, а именно – взаимодействие двух её компонентов (F- и R- систем), определяет все особенности модификационной и генотипической адаптации. Однако не менее важным компонентом, участвующем в адаптации, является постоянно меняющаяся внешняя среда.

Роль среды в адаптиогенезе. Гипотеза о связи приспособленности и рекомбинации

Главной направляющей силой эволюционного развития является взаимоотношение организма и изменяющейся среды, ведущее через процесс естественного отбора к адаптиогенезу [17]. Основными факторами, лимитирующими эту ориентацию, являются: 1) экологические условия данной адаптивной зоны; 2) генетическая структура популяции. Процесс адаптации можно рассматривать как постоянное следование вида за изменяющейся средой, подобно Чёрной Королеве из «Алисы в Зазеркалье» Л. Кэрролла, которая должна была всё время бежать, чтобы оставаться на месте (гипотеза «Чёрной Королевы») [18]. Организм и среда непрерывно взаимодействуют друг с другом и, несмотря на то, что естественный отбор адаптирует организм к определённым условиям среды, эти условия сами изменяются под влиянием эволюции организмов. Для того, чтобы вид мог существовать в условиях непрерывно изменяющейся среды, он должен обладать достаточным запасом наследственной изменчивости, который давал бы возможность для приспособительных изменений в дальнейшем. Источником такой изменчивости у высших организмов является рекомбинация генов. С одной стороны, она постоянно продуцирует новые генотипы и увеличивает тем самым адаптацию популяций к возможным изменениям среды, с другой – уменьшает непосредственную приспособленность популяции, т.к. большинство новых рекомбинаций заканчивается «генетической смертью» их носителей [4; 5]. Слишком высокий уровень рекомбинации является, таким образом, неадаптивным, т.к. приводит к распаду ценных комплексов генов, которые были объединены в процессе естественного (искусственного) отбора. В то же время ограниченный потенциал рекомбинации не позволяет виду адаптироваться к значительным изменениям экологических условий. Данное противоречие разрешается в концепции о связи индивидуальной приспособленности организмов с частотой и спектром рекомбинантов в их потомстве [1; 4; 5]. Согласно этой концепции, организмы, обладающие большей онтогенетической приспособленностью к данному фактору среды, характеризуются меньшим изменением частоты рекомбинации при действии фактора, и наоборот. Таким образом, индивидуальная приспособленность играет роль своеобразного «буфера», ограничивающего напрасное рассеивание генотипической изменчивости в результате рекомбинации. Или, применительно к генетической системе вида, влияние среды на функционирование R-системы осуществляется через



посредство F-системы. Рекомбинации, частота и спектр которых зависят от R-системы и её работы в изменившихся условиях среды, увеличивают генотипическую изменчивость в популяциях, в том числе и по признакам F-системы. Таким образом осуществляется взаимодействие F- и R- систем, придающее определённую целесообразность реакции популяции на внешние воздействия: отклонение условий среды от оптимума вызывает увеличение частоты рекомбинации лишь у наименее приспособленных генотипов, обеспечивая тем самым возможность генотипической адаптации в их потомстве. Возможно, генотипические адаптации к температурному фактору также являются следствием естественного (искусственного) отбора, протекающего на основе взаимодействия F- и R- систем.

Влияние температуры на частоту рекомбинации

Несмотря на многообразие типов рекомбинация, наибольшее значение в генерировании изменчивости у высших организмов отводится мейотической рекомбинации (кроссинговеру) [1; 6]. Обмен хромосомными сегментами, имеющий место при кроссинговере, можно легко зарегистрировать генетическими методами, изучая распределение сцепленных маркерных генов в F_2 (F_A), или цитологически, по появлению хиазм между гомологичными хромосомами в мейозе. Ещё в первых работах на дрозофиле было показано, что при прохождении мейоза в температурных условиях, отклоняющихся в большую или меньшую сторону от экологического оптимума, частота кроссинговера (rf, от англ. recombination frequency) в центромерной зоне второй хромосомы возрастает [19; 20]. Эти наблюдения неоднократно подтверждались другими исследователями [21; 22]. Аналогичные результаты были получены также для различных зон третьей хромосомы дрозофилы [23]. Четыре расы *Locusta* показали возрастание частоты хиазм в длинных и средних хромосомах при действии высокой температуры [24]. У особей трёх видов прямокрылых, инкубированных при повышенной и пониженной температурах, частота хиазм была выше, чем в контроле [25]. Минимальная частота кроссинговера при оптимальной температуре и её повышение при отклонении температуры от оптимума обнаружены у грибов *Ustilago*, *Neurospora*, *Sordaria*, *Coprinus* [26–28], а также у печёночника *Sphaerocarpus* [29]. Повышение уровня кроссоверных обменов при экстремальных температурах отмечалось и у высших растений, в частности у лука [30] и томата [31] (изучалось изменение частоты хиазм). Причём для томата данные по частоте хиазм хорошо согласуются с оценками изменения rf на основе маркерного анализа и анализа поведения количественных признаков в F_2 . Характерно, что при слишком сильных отклонениях температуры от оптимума частота обменов претерпевала уменьшение. Более устойчивые к стрессу формы сохраняли нормальную частоту хиазм и кроссинговера в большем диапазоне температур, по сравнению с менее устойчивыми, что можно рассматривать как проявление принципа связи приспособленности и рекомбинации [4; 5]. Приведенные выше данные свидетельствуют в пользу U-образной зависимости частоты рекомбинации от температуры [20], где минимальное значение частоты рекомбинации соответствует оптимуму температурных условий. Такую зависимость можно рассматривать как оптимальную стратегию рекомбинационной системы, обеспечивающую наилучшее разрешение противоречия между требованием максимальной приспособленности к существующим условиям и необходимостью сохранения генетической гибкости в будущем [1]. Тем самым достигается минимум рассеивания потенциальной генетической изменчивости, когда потребности в ней минимальны.



Тем не менее, в литературе имеется большое количество противоположных данных, согласно которым при прохождении мейоза в оптимальных условиях уровень кроссоверных обменов максимален и снижается при отклонении температуры от оптимума (П-образная зависимость rf от t). Многие из них получены на высших растениях. Так, например, показано, что действие высокой температуры до и во время мейоза вызывает значительную редукцию частоты хиазм у яблони, бобов, львиного зева, *Uvularia perfoliata* [6], *Endymion nonscriptus*, *Hiacinthus orientalis* [32], *Tradescantia bracteata* [33], *Rheo spathacea var. variegata* [34], ржи, пшеницы [35; 36].

Подобные результаты получены и в экспериментах с использованием различных видов прямокрылых [37, 38]. В опытах на энотере [39] и пшенице [40] редуцирующее влияние на частоту хиазм оказывала не только высокая, но и низкая температура.

Итак, U-образная зависимость rf от t обнаружена главным образом при исследовании изменений частоты кроссинговера путём маркерного анализа, тогда как П-образная зависимость типична практически только для данных по частоте хиазм. Исследования на луке [30] и томате [31] – одни из немногих, где показано возрастание частоты хиазм при отклонении температуры среды от оптимума, в то время как большинство других подобных работ, проведенных на высших растениях, свидетельствуют об обратном. В ряде случаев вообще не обнаружено влияние изменений температуры на частоту рекомбинации [41; 42]. Было бы слишком категоричным утверждать о несоответствии процессов хиазообразования и кроссинговера, поскольку их единство достаточно убедительно показано экспериментально [43; 44], в том числе и в работах по визуализации обменов методом дифференциального окрашивания сестринских хроматид [45; 46]. С другой стороны, можно заметить, что изменения частоты кроссинговера в зависимости от температуры изучались главным образом на грибах, а данные по частоте хиазм получены большей частью на высших растениях и прямокрылых. Возможно, различия в реакции кроссинговера и хиазм на изменения температуры объясняются спецификой объектов, представляющих достаточно удалённые в систематическом отношении группы организмов. С этой точки зрения наиболее ценными являются работы, где показан параллелизм между данными по частоте кроссинговера и по частоте хиазм [31], однако их недостаточно для того, чтобы отрицать истинность других экспериментальных данных.

Наконец, имеются работы, где влияние температуры на частоту кроссоверных обменов оценивалось на основе анализа постмейотических конфигураций (мостов, фрагментов, тетрад) у гетерозигот по парацентрическим инверсиям и реципрокным транслокациям [47]. Во всех случаях, а в качестве объектов исследования использовались ячмень и кукуруза, высокая температура вызывала увеличение частоты кроссинговера в определённых хромосомных сегментах.

Таким образом, данные об изменении частоты кроссоверных обменов при отклонении температуры прохождения мейоза от оптимума достаточно противоречивы и трудны для их трактовки с каких-либо определённых позиций. По-видимому, разрешить имеющиеся противоречия невозможно без учёта величины температурного стресса, его продолжительности, а также сегментоспецифичности в реакции на температурные воздействия.



Временные аспекты действия температурного фактора на процесс рекомбинации и термоадаптация

Неоднократно отмечалось, что причина несоответствия данных по влиянию температуры на частоту кроссинговера (хиазм) может заключаться в том, что в многочисленных экспериментах использовались температурные воздействия различной продолжительности, приходящиеся зачастую на различные стадии мейоза [1; 6]. Считается, что следует различать температурный шок, когда экстремальная температура действует достаточно короткое время (обычно не более продолжительности мейоза), и длительные температурные воздействия. Температурный шок вызывает изменение частоты кроссоверных обменов только тогда, когда его действие приходится на отдельные непродолжительные фазы развития, когда, как считают, и происходят события, обеспечивающие кроссинговер. Это, главным образом, предмейотическая интерфаза [27; 46] и ранние стадии мейоза [28; 36; 38]. В остальных случаях зарегистрировать эффект удаётся реже. Для объяснения эффективности более поздних обработок предложена гипотеза дифференциальной элиминации кроссоверных гамет [48; 49]. В экспериментах с использованием длительных температурных воздействий, где объекты обычно выращиваются при неблагоприятных температурах с раннего возраста, эффект отчётливо выражен [32], однако может иметь противоположную направленность. Вильсон отмечал, что исследователи, которые обнаружили уменьшение частоты хиазм при изменении температуры, работали с короткими интервалами времени: Heilbom (1930) – 2–5 дней, Straub (1938) – 1 день, Barber (1942) – 1–2 дня [49]. Другие, получившие обратный эффект – возрастание частоты хиазм с ростом температуры, – использовали для воздействия более длинные периоды времени: Matsuura, Haga (1942) – 2–3 недели, Swanson (1942) – 158–165 дней, Elliott (1953) – 43–47 дней [49]. Разница в эффектах объясняется следующим образом. Когда организм помещают в неблагоприятные температурные условия, он испытывает стресс, и частота хиазм падает вследствие нарушения физиолого-биохимических процессов, лежащих в основе хиазмообразования. Если же организм длительное время находится в определённых температурных условиях, то он адаптируется к ним и частота хиазм остаётся на нормальном уровне или даже повышается, например, по причине более быстрого протекания ферментативных процессов при повышенной температуре.

С позиций значимости рекомбинации в адаптации популяций увеличение rf в ответ на кратковременные изменения температуры кажется слишком расточительным, поскольку температурные флуктуации в норме могут достигать значительных величин. Такое увеличение будет приводить к слишком быстрому рассеиванию запаса генотипической изменчивости и падению перспективной приспособленности популяции. Поэтому целесообразным с эволюционной точки зрения будет увеличение частоты рекомбинации в ответ только на длительные температурные воздействия, в силу необходимости приспособления популяции к новым температурным условиям. В этом случае высокий уровень рекомбинации будет обеспечивать большее количество вариантов для отбора генотипов с нужной нормой реакции, тем самым повышая его эффективность. Приведенные Вильсоном данные свидетельствуют в пользу возможности существования такого механизма различий в реакции на изменения температурных условий при воздействиях различной продолжительности.



Хромосома- и сегментоспецифичность рекомбиногенного действия температуры

Ещё в первых работах по температурной индукции рекомбинации [19; 20] было замечено, что первая хромосома дрозофилы не реагирует на обработку, а в хромосомах 2 и 3 реакция (увеличение *rf*) наблюдается только в проксимальных зонах и особенно в сегментах, содержащих центромеру. В дальнейшем неоднократно отмечалось, что проксимальные сегменты хромосом обладают наибольшей чувствительностью к температуре, по сравнению с дистальными и медианными [6; 21]. В целом, считается, что существует довольно чёткая и воспроизводимая тенденция к увеличению *rf* при действии температуры в проксимальных и перицентрических (т.е. содержащих центромеру) участках всех больших хромосом дрозофилы, слабый эффект в медианных зонах и отсутствие эффекта (или даже ингибирование кроссинговера) в дистальных зонах [1]. Причём увеличение *rf* составляет обычно 30–50% от контрольного уровня. У нейроспоры температурные воздействия также вызывали увеличение частоты кроссинговера в сегментах, близких к центромере и в меньшей степени влияли на *rf* в других хромосомных сегментах [50]. Центромерный эффект у нейроспоры постепенно уменьшается по направлению к концам хромосомных плеч так, что в дистальных зонах кроссинговер имеет постоянную величину независимо от температуры.

Реакция хромосом и хромосомных плеч на изменения температуры может существенно зависеть от их длины. Так, в опытах на прямокрылых [25] частота хиазм в длинных (L) и средних (M) хромосомах претерпевала существенные изменения, тогда как для коротких (S) хромосом стабильно сохранялась одна хиазма на бивалент. У гиацинта при отклонении от оптимума в сторону низких температур наибольшая редукция частоты хиазм наблюдалась в длинных хромосомах набора, для коротких же была свойственна константность в хиазмообразовании [32]. Исследования на *Uvularia pexfoliata* и *Endimion nonscriptus* [49] показали, что длинные плечи хромосом более чувствительны к температуре: при уменьшении частоты хиазм в результате её влияния они теряли относительно больше хиазм, чем короткие. У саранчи *Schistocerca gregaria* высокая температура также вызывала уменьшение частоты хиазм главным образом в длинных плечах хромосом, в то время как в коротких плечах формирование хиазм при высокой температуре было более эффективным [32].

Таким образом, влияние температуры на рекомбинацию специфично как в отношении различных хромосом набора, так и для различных зон одной и той же хромосомы. Более того, температура способна вызывать перераспределение кроссоверных обменов внутри хромосомы.

Индукцированное температурой перераспределение генетических обменов

Увеличение частоты кроссинговера в проксимальных и перицентрических сегментах хромосом дрозофилы при действии температуры может сопровождаться одновременным ингибированием обменов в дистальных зонах [6]. Такое перераспределение кроссоверных обменов свойственно и для других объектов. Так, *Tradescantia bracteata* характеризуется преимущественно терминальной локализацией хиазм (в норме интерстициальные хиазмы составляют 2% от общего числа) [33]. При увеличении температуры от 15 до 34°C количество интерстициальных хиазм возрастает до более чем 21%, тогда как число терминальных остаётся практически неизменным или претерпевает слабую редукцию. Характерно, что длительная обработка температурами, близкими к точке термической гибели, приводит к уменьшению частоты интерстициальных хиазм



у *Tradescantia*. Анализ монохизматических бивалентов саранчи *Schistocerca gregaria* показал, что одиночные хиазмы в контроле обычно интерстициальные (68%), дистальные встречаются реже (32%), а проксимальные не обнаруживаются вовсе [37]. При действии высокой температуры число одиночных интерстициальных хиазм уменьшалось до 16%, дистальных возрастало до 70% и появлялись хиазмы с проксимальной локализацией (14%). Изменения в распределении хиазм, индуцированные температурой, были обнаружены и в исследованиях на томатах [8]. Число клеток с интерстициальными хиазмами было значительно выше при отклонении температуры от оптимума (как известно, этот тип хиазм у томата встречается весьма редко). Если учесть, что именно интерстициальные обмены обеспечивают высвобождение генотипической изменчивости в популяциях [1], то в свете рассматриваемых проблем увеличение частоты интерстициальных хиазм будет способствовать более быстрой температурной адаптации.

К вопросу о механизмах влияния температуры на процесс рекомбинации

Одна из первых гипотез, объясняющих неслучайное распределение кроссоверных обменов по хромосоме и причины температурной модификации их числа и положения была выдвинута Мазером [51]. Он интерпретировал частоту хиазм и результаты воздействия на неё факторов среды в терминах дифференциального и интерференционного расстояния. Согласно Мазеру, формирование хиазмы в данном районе хромосомы зависит от его положения по отношению к центромере. Первая хиазма на хромосомном плече формируется на определённом расстоянии от центромеры (дифференциальное расстояние). Вторая хиазма обычно удалена от первой на расстояние, определяемое как интерференционное. Каждое из расстояний генотипспецифично: величина дифференциального расстояния определяется влиянием центромеры, а интерференционного – физическими свойствами хроматина. По Мазеру, температура может уменьшать дифференциальное расстояние, что приводит к увеличению частоты кроссинговера в зонах, прилежащих к центромере. Модификация температурой интерференционного расстояния сказывается на количестве обменов, свойственном для каждой данной хромосомы. В целом, обусловленные температурой и специфичные для каждого генотипа изменения выделенных Мазером переменных величин создают сложную картину модификации частоты и распределения кроссоверных обменов. Гипотеза Мазера базировалась на данных опытов White (1934), в которых высокая температура уменьшала расстояние от центромеры до первой хиазмы (дифференциальное расстояние), и Maffet (1936), где чувствительным было только расстояние между двумя соседними хиазмами (интерференционное расстояние) [49]. Считается, что причина снижения интерференции обменов при росте температуры заключается в уменьшении «ригидности», «напряжённости» [25] или «вязкости» [33] хроматина, которые препятствуют осуществлению кроссоверных обменов в непосредственной близости друг от друга.

Для объяснения результатов экспериментов многие исследователи пользовались гипотезой Мазера [49]. Параллельно развивалась концепция о том, что температура модифицирует частоту и распределение кроссоверных обменов посредством изменения эффективности гомологичного хромосомного спаривания, являющегося необходимым условием для осуществления кроссинговера [32; 33]. Так, Барбер полагал, что с увеличением скорости прохождения мейоза при высокой температуре время спаривания гомологов уменьшается так, что только отдельные участки хромосом успевают конъюгировать [52]. Места формирования хиазм ограничиваются немногочисленными районами гомологичного хромосомного спаривания, что приводит к значительной редукции



их числа. В своих взглядах Барбер основывался на выводах Дарлингтона о причинах неполного спаривания и проксимальной локализации хиазм у видов *Fritillaria* с очень длинными хромосомами [43]. Последний объяснял обнаруженные феномены лимитом времени для спаривания для длинных хромосом набора. Спаривание в таких хромосомах обычно наблюдается только в местах его инициации – проксимальных участках, – что и приводит впоследствии к проксимальной локализации хиазм. Для хромосом средней и малой длины лимит времени спаривания отсутствует, однако он может вызываться искусственно, например, действием высокой температуры. Так считают не только Barber [52], но и Elliott [32], Dowrick [33], Henderson [37]. К редукции числа хиазм при температурных воздействиях может приводить не только лимит времени для спаривания, но и снижение его эффективности. При конъюгации гомологов, считает Хендерсон, следует разделять районы эффективного и неэффективного, или «торсионного» спаривания [37]. В районах эффективного спаривания осуществляется кроссинговер и формируются хиазмы, тогда как «торсионное» лишь удерживает гомологи вместе за счёт скручивания. При повышении температуры может иметь место прогрессивное ограничение эффективного спаривания всё меньшими и меньшими сегментами, что будет приводить к значительной редукции числа кроссоверных обменов.

Накапливаются сведения о том, что температура оказывает влияние и на этапы, предшествующие хромосомному спариванию, а именно, на определение пространственного расположения гомологов и инициацию синапсиса [36]. К таким выводам исследователи пришли, изучая гомологичное спаривание плеч изохромосомы (хромосомы с двумя генетически идентичными плечами). В ходе мейоза изохромосомы часто конъюгируют «в себе», образуя характерные U-образные фигуры. Существенно, что два гомологичных плеча изохромосомы не могут изменять своё пространственное положение друг относительно друга. Высокая температура, вызывая существенную редукцию числа хиазм в хромосомах пшеницы, не оказывала влияния на процесс хиазмообразования в изохромосоме. Высказано предположение, что температура не действует на процессы завершения гомологичного хромосомного спаривания в поздней зиготене и формирования хиазм в пахитене-диплотене, а, скорее, оказывает влияние на этапы пространственной ориентации хромосом и инициации синапсиса в лептотене-ранней зиготене. Замечено, что спаривание изохромосомных плеч не подвергается и влиянию колхицина, который эффективно модифицирует конъюгацию других хромосом набора, что позволяет утверждать о сходстве в механизмах действия колхицина и температуры. Возможно, мишенью для действия температуры и колхицина служит обнаруживаемый в период от последнего предмейотического митоза до лептотены фибриллярный материал [53], связывающий гомологи с ядерной мембраной и участвующий в их ориентации друг относительно друга [36].

Бэтман и Чэндли [54] рассматривают эффект температуры на частоту и распределение кроссоверных обменов как результат двух относительно независимых процессов: 1) индуцированного увеличения числа точек обмена, более или менее равномерно распределённых по длине хромосомы; 2) нарушения конъюгации гомологов, которое распространяется от теломер к центромере. Понятно, что индуцирующий эффект температуры будет проявляться только в тех зонах, где конъюгация сохраняется, а, именно, в прицентромерных. В дистальных зонах будет наблюдаться уменьшение частоты кроссинговера, а в зонах, где вышеуказанные противоположные эффекты компенсируют друг друга, реакция по *rf* будет отсутствовать. Модель Бэтмана и Чэндли, таким об-



разом, хорошо объясняет многочисленные экспериментальные данные по сегментоспецифичности температурной индукции рекомбинации у дрозофилы.

Имеются сведения и о генетическом контроле зависимости частоты рекомбинации от температуры. Так, неоднократно отмечались различия в чувствительности к действию температуры относительно изменения частоты кроссоверных обменов у различных генотипов в пределах вида. Такие различия доложены для различных сортов яблони, линий *Imatiens balsamina*, клонов *Endymion nonscriptus*, растений бобов и томатов [1; 6]. Согласно Riley [40], уменьшение частоты хиазм при низких температурах у пшеницы происходит в связи с нехваткой хромосомы 5, которая несёт один или более генов, стабилизирующих мейотическую конъюгацию при изменениях температуры. Считают, что величина сдвигов частоты рекомбинации у *Schizophyllum commune* зависит от генотипа и хромосомного сегмента потому, что действие генов, контролирующей рекомбинацию, распространяется лишь на короткие участки хромосом и каждый из генов обладает различной температурной чувствительностью [6].

В ряде работ механизм влияния температуры на рекомбинацию интерпретируется с использованием молекулярных моделей [28; 55]. Основные процессы, обеспечивающие кроссинговер на молекулярном уровне, включают образование первичных разрывов ДНК (ников), диссоциацию нитей ДНК, формирование гетеродуплекса, миграцию полухиазмы, репарацию молекулярных гетерозигот [56]. Согласно модели Лю и соавторов, высокотемпературная обработка *Coprinus* увеличивает rf за счёт индукции дополнительных одностранных разрывов ДНК, являющихся необходимым условием осуществления обмена [55]. Низкая же температура повышает число сохраняющихся в пахитене и доступных для обмена ников путём предотвращения их репарации (число первичных разрывов, приходящихся на один кроссоверный обмен довольно велико, например 10^4 – 10^5 у лилии [57]), однако большинство из них репарируется. Никобразование может вызываться в течение довольно длительного периода, поэтому, считают авторы, высокая температура обладает слабой стадиоспецифичностью. Низкая же температура, напротив, обладает сильной стадиоспецифичностью, поскольку задержка репарации ников, вызываемая ею, может иметь эффект только в пахитене, когда гомологи тесно спарены. Действуя на репарацию одностранных разрывов, низкая температура, вместе с тем, может нарушать репарационный синтез ДНК, обеспечивающий коррекцию в сайтах молекулярной гетерозиготности, без которой продукты обмена будут нежизнеспособны.

Таким образом, литературные данные свидетельствуют о том, что рекомбинационное действие температуры осуществляется посредством изменения ряда ключевых процессов мейоза, обеспечивающих кроссинговер. Ещё Дарлингтон постулировал существование трёх первичных (основных) переменных величин мейоза (prime variables of meiosis), которые зависят от особенностей генетической системы вида, а также могут изменяться под действием внешних факторов и изменять тем самым число и положение кроссоверных обменов [43]. Позднее Хендерсон значительно расширил этот список, рассматривая в качестве важнейших следующие первичные переменные мейоза: группа 1, временные переменные: 1) время мейотической индукции; 2) продолжительность фазы синтетического роста; 3) начало и длительность эффективного удвоения; 4) время инициации и продолжительность гомологичного спаривания; 5) время формирования хиазм; группа 2, структурные переменные: 6) районы инициации эффективного удвоения; 7) районы инициации гомологичного спаривания; 8) «потенциал» хиазм (число, положение, интерференция); 9) хромосомная длина; 10) положение центромера;



а также 11) общая и специфическая координация всех указанных факторов [37]. Некоторые переменные определяются исключительно генетическими особенностями вида (например, хромосомная длина, положение центромеры), тогда как большинство других, по-видимому, может быть модифицировано действием факторов внешней среды, в том числе и температуры. Подтверждением служат данные различных авторов, приведенные ранее. Участие в определении частоты и положения кроссоверных обменов большого числа чувствительных к температуре факторов, их координация и взаимодействие, вероятно, и создают ту сложную и зачастую противоречивую картину зависимости gf от t , которая обнаружена в экспериментах.

Системная регуляция зависимости частоты и спектра рекомбинации от температурных условий существования

Поскольку процесс кроссинговера включает значительное число этапов, которые в той или иной мере подвержены влиянию температуры, вызываемые ею изменения обычно носят системный характер. Полагают, что температура оказывает как непосредственное действие на метаболизм предмейотических и мейотических клеток и функционирование молекулярных систем конъюгации и рекомбинации, так и косвенное, через изменение метаболических процессов в целом организме [1]. Причём эффект непосредственного действия температуры рассматривают как результат проявления нормы реакции R-системы, а косвенного – как результат влияния нормы реакции F-системы на R-систему. Примечательно, что оба типа влияния могут осуществляться одновременно, однако доля влияния каждого из них в становлении конечного результата, вероятно, будет различной для разных организмов. Считается, что для высших животных, отличающихся гомойотермностью, высокой интегрированностью и эффективностью гомеостатических процессов, косвенное влияние температуры (в том числе и опосредованное ЦНС) играет значительную, если не решающую роль в индуцировании кроссинговера [1]. Для растений, по-видимому, дело обстоит иначе. Являясь пойкилотермными организмами, растения способны лишь в незначительной степени регулировать собственную температуру путём транспирации, а в условиях интенсивной инсоляции температура их тканей и вовсе превышает температуру окружающей их среды иногда на десятки градусов. Колебания температуры передаются генеративным клеткам, в том числе материнским клеткам пыльцы (РМС), в которых и происходит кроссинговер. Как и большинство клеточных ферментов, ферменты, участвующие в процессе кроссинговера, обладают температурным оптимумом и границами функционирования, так что любое отклонение температуры от нормы будет сопровождаться сдвигами в ходе ферментативных реакций, так или иначе отражающимися на прохождении кроссинговера. Температура может также модифицировать физические свойства хроматина, вязкость ядерного матрикса и др. [58].

Таким образом, есть все основания утверждать, что прямое действие температуры на кроссинговер у растений осуществляется повсеместно в силу их пойкилотермности. Температурные воздействия приводят и к сдвигам в ходе многочисленных ферментативных реакций, обеспечивающих обмен веществ в клетках. Так, например, фотосинтетическая активность клеток имеет отчётливо выраженные температурные границы и оптимум, лежащий обычно в пределах 20–35°C [59], отклонения от которого сопровождаются нарушением баланса между фотосинтезом и дыханием и, вследствие этого, к сдвигам метаболизма. Отметим, что такие сдвиги, связанные с трофическими процессами, в меньшей мере свойственны мейоцитам, питание которых целиком осу-



ществляется за счёт вспомогательных клеток тапетума. Тем не менее изменённые метаболиты могут попадать в генеративные клетки из других тканей и органов растения, оказывая влияние на процесс кроссинговера. Такое влияние принято рассматривать как косвенное. Из-за сравнительно небольших скоростей транспорта веществ в растении и удалённости органов требуется длительное время и значительная концентрация модифицированных температурой метаболитов для того, чтобы они достигли мейоцитов и оказали скольнибудь существенное влияние. Поэтому, логично предположить, что при температурных воздействиях вначале сказывается прямое влияние температуры и лишь через некоторое время – косвенное. Температурный шок (воздействие небольшой продолжительности), вероятнее всего, будет оказывать лишь прямое влияние, так как концентрация изменённых метаболитов других тканей за короткое время вряд ли сможет достигнуть существенных значений. Длительное температурное воздействие, напротив, будет приводить к существенной перестройке обмена веществ, вплоть до включения процессов морфо-анатомической и физиолого-биохимической адаптации, оказывая посредством этого косвенное влияние на прохождение кроссинговера. Скорее всего, практически всегда мы имеем дело со сложным взаимодействием процессов прямого и опосредованного влияния температуры на кроссинговер, что и приводит к затруднительным для однозначной трактовки результатам.

Температурные воздействия практически всегда сопровождаются рекомбинантным эффектом, однако, как уже отмечалось, сила ответной реакции в значительной мере зависит от генотипа. Такие отличия обусловлены, по видимому, различной нормой реакции как генетической системы контроля вегетативного развития (F-), так и системы, определяющей особенности рекомбинации (R-). Более того, имеются экспериментальные данные, показывающие, что изменения признаков, контролируемых F- и R- системами, взаимосвязаны, причём, чем больше отклонения от нормы первых (а такие отклонения тем больше, чем меньше приспособленность генотипа), тем сильнее изменяются вторые. Так, в опытах на 12 различных генотипах дрозофилы было показано, что частота кроссинговера отрицательно коррелирует с параметрами приспособленности к температурному воздействию [7]. Приспособленность оценивалась по степени изменения фертильности яиц, плодовитости мух и др. при изменениях температуры. Чем больше была приспособленность генотипов к температуре (т.е. стабильность изучаемых показателей), тем меньше была частота кроссоверных особей в их потомстве и наоборот. Аналогичная связь показана в экспериментах на томатах [8]. Действие пониженной температуры вызывало увеличение частоты хиазм у нехолодостойкого сорта Глория и не влияло на устойчивые растения сорта Север и гибрида Север x Глория. Напротив, повышенная температура приводила к росту числа обменов у холодостойких (но не жаростойких) форм, не влияя на мейоз жаростойкой Глории. Увеличение частоты хиазм сопровождалось изменением спектра белков, что, как полагают, является следствием низкой приспособленности метаболических реакций к экстремальным температурам. Приведенные экспериментальные данные показывают, таким образом, что система контроля вегетативного развития (F-) играет защитную роль (онтогенетический буфер) [4; 5], обеспечивая неизменность процесса кроссинговера (стабильность R-системы) в условиях, которые организм переносит нормально (к которым он приспособлен), и роль посредника в действии факторов среды на функционирование R-системы, если организм к ним не приспособлен. Причём, согласно концепции о связи приспособленности и рекомбинации, у наиболее приспособленных организмов частота рекомбинации в таких условиях будет изменяться в наименьшей степени. Следует от-



метить, что ещё ранее М.Е. Лобашёв высказал гипотезу о взаимосвязи между уровнем приспособленности и мутабельностью: чем меньше организм адаптирован к определённому фактору среды, тем эффективнее этот фактор индуцирует мутационные изменения [60]. Учёный также выдвинул концепцию системного контроля генетических и цитологических процессов в организме, основываясь на экспериментально показанной возможности косвенного влияния внешних факторов (за счёт нарушения нормальных метаболических реакций) на мутационный процесс. Частота кроссинговера также может коррелировать с активностью физиологических процессов. Так, например, в период максимальной двигательной активности дрозофилы индуцированные кратковременным температурным воздействием изменения *rf* были максимальны [61]. Полагают, что это свидетельствует об общности механизмов, детерминирующих активность нервной системы и цитогенетических процессов в зародышевой линии клеток [1].

Итак, несмотря на немногочисленность экспериментальных данных, всё же имеются основания полагать, что действие температуры на частоту рекомбинации носит системный характер и что наблюдаемый эффект есть результат сложного взаимодействия ответных реакций различных составляющих целого организма. Попытка расчленить системное действие температуры на составляющие заслуживает пристального внимания, ибо может, в конечном счёте, пролить свет на механизмы индуцированного рекомбиногенеза и – шире – на механизмы взаимодействия среды и генетических систем, в конечном счёте ответственные за эволюцию органического мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жученко, А.А. Рекомбинация в эволюции и селекции / А.А. Жученко, А.Б. Король. – М. : Наука, 1985. – 400 с.
2. Бородин, П.М. Генетическая рекомбинация в свете эволюции / П.М. Бородин // Природа. – 2007. – № 1. – С. 14–22.
3. Мюнтцинг, А. Генетика / А. Мюнтцинг. – М. : Мир, 1967. – 610 с.
4. Жученко, А.А. Экологическая генетика культурных растений / А.А. Жученко. – Кишинев : Штиинца, 1980. – 587 с.
5. Жученко, А.А. Адаптивный потенциал культурных растений (эколого-генетические основы) / А.А. Жученко. – Кишинёв : Штиинца, 1988. – 768 с.
6. Дишлер, В.Я. Индуцированный рекомбиногенез у высших растений / В.Я. Дишлер. – Рига : Зинатне, 1983. – 222 с.
7. Связь между уровнем рекомбинации и некоторыми параметрами приспособленности у дрозофилы / А.А. Жученко [и др.] // Адаптация и рекомбиногенез у культурных растений : материалы Междунар. конф., Кишинёв, Ин-т эколог. Генетики АН РМ. – Кишинёв, 1982. – С. 49–50.
8. Изучение взаимосвязи между модификационной и генотипической изменчивостью у томата / А.А. Жученко и др. // Экологическая генетика растений и животных : материалы 2-й Всесоюз. конф., Кишинёв, Ин-т эколог. генетики АН РМ. – Кишинёв, 1984. – С 109–113.
9. Майр, Э. Зоологический вид и эволюция / Э Майр. – М. : Мир, 1968 – 597 с.
10. Лобашёв, М.Е. Генетика / М.Е. Лобашёв. – Л. : ЛГУ, 1969. – 751 с.
11. Darlington, C.D. The elements of genetics / C.D. Darlington, K. Mather. – L. : Allen and Unwin, 1949. – 446 p.



12. Айала, Ф. Механизмы эволюции / Ф. Айала // Эволюция : сб. ст. – М. : Мир, 1981. – С. 33–65.
13. Dobzhansky, Th. Evolution of genes and genes in evolution / Th. Dobzhansky. – Quant. Biol. – 1959. – Vol. 24. – P. 15–27.
14. Darlington, C.D. The evolution of genetic systems / C.D. Darlington. – Cambridge : Cambridge university press, 1939. – 149 p.
15. Grant, V. Genetics of flowering plants / V. Grant. – N.Y. : Columbia Univ. press, 1975. – 514 p.
16. Grant, V. The regulation of recombination in plants / V. Grant // Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. – 1958. – Vol. 23. – P. 337–363.
17. Северцов, А.Н. Морфологические закономерности эволюции / А.Н. Северцов. – М., 1939. – 443 с.
18. Левонтин, Р. Адаптация / Р. Левонтин // Эволюция : сб. ст. – М. : Мир, 1981. – С. 241–264.
19. Plough, H.H. The effect of temperature on crossing-over in *Drosophila* / H.H. Plough // J. Exp. Zool. – 1917. – Vol. 24. – № 2. – P. 147–209.
20. Plough, H.H. Further studies of the effect of temperature on crossing over / H.H. Plough // J. Exp. Zool. – 1921. – Vol. 32. – № 2. – P. 187–202.
21. Stern, C. An effect of temperature and age on crossing-over in the first chromosome of *Drosophila melanogaster* / C. Stern // Proc. Nat. Acad. Sci. US. – 1926. – Vol. 12. – P. 530–532.
22. Smith, H.F. Influence of temperature on crossing over in *Drosophila* / H.F. Smith // Nature. – 1936. – Vol. 138. – P. 329–330.
23. Politzer, O. Veränderung der Cross-over Häufigkeit durch Einwirkung von Temperatur und Alter / O. Politzer // Ztschr. Induct. Abstamm. Vererb. – 1940. – H. 78. – S. 129–147.
24. Nolte, D.J. Genetic and environmental factors affecting chiasma formation in locust / D.J. Nolte, I. Desi, B. Meyers // Chromosoma. – 1969. – Vol. 27. – P. 145–155.
25. White, M.J.D. The influence of temperature on chiasma frequency / M.J.D. White // Genetics. – 1934. – Vol. 29. – P. 203–215.
26. Towe, A.M. Effects of temperature on crossing-over in *Neurospora* / A.M. Towe, D.R. Stadler // Genetics. – 1964. – Vol. 49. – P. 577–583.
27. Lamb, B.C. Evidence from *Sordaria* that recombination and conversion frequencies are partly determined before meiosis, and a general model of the control of recombination frequencies / D.C. Lamb // Genetics. – 1969. – Vol. 63. – № 4. – P. 807–820.
28. Lu, B.C. Genetic recombination in *Coprinus*. 4. A kinetic study of the temperature effect on recombination frequency / B.C. Lu // Genetics. – 1974. – Vol. 78. – № 2. – P. 661–677.
29. Abel, W.O. Untersuchungen über den Einfluß der Temperatur auf die Rekombinationshäufigkeit bei *Sphaerocarpus* / W.O. Abel // Ztschr. Vererbungslehre. – 1964. – H. 4. – S. 306–317.
30. Полякова, Т.Ф. Влияние высоких и низких температур на образование хиазм у *Allium scera L* / Т.Ф. Полякова // ДАН СССР. – 1940. – Т. 27. – № 6. – С. 594–597.
31. Гавриленко, Т.А. Влияние температуры на рекомбинацию у томатов / Т.А. Гавриленко // Цитология и генетика. – 1984. – Т. 18. – № 5. – С. 347–352.
32. Elliott, C.G. The effect of temperature on chiasma frequency / C.G. Elliott // Heredity. – 1955. – Vol. 9. – Pt. 3. – P. 385–398.
33. Dowrick, G.I. The influence of temperature on meiosis / G.I. Dowrick // Heredity. – 1955. – Vol. 9. – Pt. 3. – P. 385–398.



34. Lin, Y.L. Temperature and chiasma formation in *Rheo spathacea* var. *variegata* / Y.L. Lin // *Genetica*. – 1982. – Vol. 60. – P. 25–30.
35. Fu, T.K. The relationship between chiasmata and crossing over in *Triticum aestivum* / T.K. Fu, E.R. Sears // *Genetics*. – 1973. – Vol. 75. – № 2. – P. 231–246.
36. Kato, T. Reduction of meiotic homologous chromosome pairing due to high temperature in common wheat / T. Kato, H. Yamagata // *Jap. J. Genet.* – 1980. – Vol. 55. – № 5. – P. 337–348.
37. Henderson, S.A. Temperature and chiasma formation in *Schistocerca gregaria*. 2. Cytological effects at 40°C and the mechanism of heat induced univalence / S.A. Henderson // *Chromosoma*. – 1969. – Vol. 27. – P. 145–155.
38. Peacock, W.J. Chiasmata and crossing-over / W.J. Peacock // *Replication and recombination of genetic material*. – Canberra: Austral. Acad. Sci., 1968. – P. 242–252.
39. Oehlkers, F. Untersuchungen zur Physiologie der Meiosis / F. Oehlkers // *Ztschr. Bot.* – 1936. – H. 30. – S. 253–276.
40. Riley, R. Genotype-environmental interaction affecting chiasmata frequency in *Triticum aestivum* / R. Riley // *Chromosomes today*. – Edinburgh : Oliver and Boyd, 1966. – Vol. 1. – P. 57–65.
41. Stadler, L.J. The variability of crossing-over in maize / L.J. Stadler // *Genetics*. – 1926. – Vol. 11. – № 1. – P. 1–37.
42. Jensen, J. Effect of temperature on genetic recombination in barley / J. Jensen // *Hereditas*. – 1981. – Vol. 94. – № 2. – P. 215–218.
43. Darlington, C.D. The evolution of genetic systems / C.D. Darlington. – Cambridge : Cambridge University Press, 1939. – 149 p.
44. Brown, S.W. The relationship of chiasmata and crossing over in *Lilium formosum* / S.W. Brown, D. Zohary // *Genetics*. – 1955. – Vol. 40. – № 1. – P. 1–37.
45. Tease, C. Analysis of exchanges in differentially stained meiotic chromosomes of *Locusta migratoria* after BrdU-substitution and FPG staining. 1. Crossover exchanges in monochiasmate bivalents / C. Tease, G.H. Jones // *Chromosoma*. – 1978. – Vol. 69. – № 2. – P. 145–155.
46. Kanda, N. Analysis of crossing over in mouse meiotic cells by BrdU labeling technique / N. Kanda, H. Kato // *Chromosoma*. – 1980. – Vol. 78. – № 1. – P. 113–122.
47. Maguire, M.P. Chromosome pairing in altered constitutions and models of synapsis and crossing-over / M.P. Maguire // *Genetical Research*. – 1968. – Vol. 12. – P. 21–27.
48. Puro, J. Changes in the frequency of crossing-over in X-irradiated *Drosophila melanogaster* female / J. Puro // *Ann. Zoolog. Fenn.* – 1970. – Vol. 3. – P. 431–438.
49. Wilson, J.Y. Duration of meiosis in relation to temperature / J.Y. Wilson // *Heredity*. – 1959. – Vol. 13. – Pt. 12. – P. 263–267.
50. Landner, L. Variation of recombination frequency in *Neurospora crassa* following meiosis and evidence for a premeiotic sensitive stage / L. Landner // *Mol. And Gen. Genet.* – 1970. – Vol. 109. – № 3. – P. 219–232.
51. Mather, K. The determination of position in crossing-over. 1. *Drosophila melanogaster* / K. Mather // *J. Genet.* – 1936. – Vol. 33. – № 2. – P. 207–235.
52. Barber, H.N. Chromosome behaviour in *Uvularia* / H.N. Barber // *J. Genet.* – 1941. – Vol. 42. – P. 223–257.
53. Bennett, M.D. Chromatin attachment to nuclear membrane of wheat pollen mother cells / M.D. Bennett, H. Stern, M. Woodward // *Nature*. – 1974. – Vol. 252. – P. 395–396.



54. Bateman, A.J. Effects of X-rays on female germ cells of *Drosophila melanogaster*. Crossing-over in the X-chromosome // A.J. Bateman, A.C. Chandley // *Mutat. Res.* – 1965. – Vol. 2. – № 6. – P. 506–522.
55. Lu, B.C. Genetic recombination in *Coprinus*. 5. Repair synthesis of deoxyribonucleic acid and its relation to meiotic recombination / B.C. Lu, S.M. Chiu // *Mol. And Gen. Genet.* – 1976. – Vol. 147. – № 2. – P. 121–127.
56. Кушев, В.В. Механизмы генетической рекомбинации / В.В. Кушев. – Л. : Наука, 1971. – 247 с.
57. Stern, H. Biochemistry of meiosis / H. Stern, Y. Hotta // *Philos. Trans. Roy. Soc. London B.* – 1977. – Vol. 277. – P. 277–294.
58. Александров, В.Я. Клетки, макромолекулы, температура / В.Я. Александров. – Л. : Наука, 1975. – 353 с.
59. Гэлстон, А. Жизнь зелёного растения / А. Гэлстон, П. Дэвис, Р. Сэттер. – М. : Мир, 1983. – 550 с.
60. Лобашёв, М.Е. Физиологическая (паранекротическая) гипотеза мутационного процесса / М.Е. Лобашёв // *Вестн. ЛГУ.* – 1947. – № 8. – С. 10–29.
61. О роли нервной системы в регуляции различных генетических и цитологических процессов / М.Е. Лобашёв [и др.] // *Журн. эволюц. биохим. и физиол.* – 1973. – № 9. – С. 398–405.

A.N. Tarasyuk Temperature Induction of Recombination and Genetical Adaptation of Higher Organisms

The role of recombination in the process of adaptation of higher organisms to the changing environmental conditions and its importance for the selection is discussed in this article. The data of temperature effect as the most important abiotic factor on the frequency and distribution of genetic exchange is analyzed. Stage and segmentation specificity, temporal dependence of the temperature influence on the process of recombination is defined. Hypotheses of mechanisms of temperature induction of recombination have been shown. The results are interpreted on the basis of F- and R-system and concept of connection between adaptation and recombination.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 04.06.2013



УДК 913 (476)

С.В. Корженевич

РЕГИОН КАК ОБЪЕКТ ЭКОНОМИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статья посвящена одной из актуальных проблем социально-экономической географии – региональным географическим исследованиям. Автором проанализированы различные подходы ведущих ученых к проблемам изучения регионов. Показана роль ведущих географических школ в изучении данного вопроса – американской, английской, немецкой, советской, французской. В работе дан подробный анализ развития научных взглядов на изучение регионов Беларуси на примере Белорусского Полесья.

Введение

Региональный аспект Национальной программы устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь до 2020 г. четко определяет разработку и внедрение комплексных территориальных исследований по самому широкому спектру проблем. И это связано прежде всего с тем, что на общем фоне глобализации экономических и общественных процессов резко возрастает роль регионов, так как именно в них протекает повседневная жизнедеятельность людей, формируются ячейки человеческого бытия в непосредственном контакте с природной средой, генерируются инновации и политические решения. Границы регионов, выделенных в качестве объектов региональной политики, могут совпадать с границами отдельных или нескольких административно-территориальных единиц [1, с. 348]. Регион – это не хаотичное скопление географических объектов, а территория, обладающая относительной целостностью, обусловленной взаимосвязью и взаимозависимостью между компонентами и процессами в ее пределах. Регионализм отражает значительные природные, хозяйственные, социальные и этнокультурные различия между районами страны. Тенденция регионализации отражает стремление масштабных структур к равновесному состоянию не за счет универсализации ее составляющих, а за счет приобретения ими уникальности [2, с. 23].

Решение социально-экономических проблем в Республике Беларусь обусловило необходимость более углубленного научного обоснования качественно новой региональной демографической политики, адаптированной к специфическим особенностям того или иного региона. Сформулированные в Национальной программе устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь до 2020 года программы развития регионов требуют качественно новой оценки их социального развития — совершенствования традиционных и применения инновационных подходов к их изучению. В сложившейся ситуации комплексный анализ развития регионов является актуальной задачей современной географии. Исходя из вышеотмеченного, был проведен ретроспективный анализ развития региональной географии, социально-экономических исследований Белорусского Полесья как региона Республики Беларусь. В статье рассмотрена эволюция научных взглядов на региональные географические исследования, в систематизированном виде представлен вклад ведущих географических школ в изучении данного вопроса, показана роль отдельных ученых в исследовании регионов.

Предпосылки региональных географических исследований

Формирование теории и методологии изучения региональных особенностей населения относится к середине XVIII в., когда в Амстердаме появился труд Б. Варена «Всеобщая география», в котором автор впервые разделил географическую науку на общую и региональную. Региональную географию Б. Варен назвал сравнительной, то



есть рассматривающей свойства в сравнении одного места с другим. В XVIII в. были сделаны определенные шаги в направлении научного изучения народонаселения: немецкий ученый И. Зюльсмих отметил наличие статистических закономерностей в демографических данных, а его соотечественник А. Бюшинг впервые применил показатель плотности населения в качестве географической характеристики. В XVIII–XIX вв. значительный вклад в развитие региональной географии и страноведения внесла немецкая школа описательного государствоведения, которая в качестве парадигмы выдвигала описательно-статистическое направление, в том числе и касающееся вопросов населения. В середине XIX в. оформилась новая научная школа – антропогеография, основателем которой был немецкий ученый Ф. Ратцель. Задача антропогеографии, по мнению Ф. Ратцеля, состояла в изучении расселения в связи с различиями окружающей географической среды, а также складывающегося в процессе расселения образа жизни людей [2, с. 12–14].

Первые десятилетия XX в. ознаменовалось новым витком в исследовании регионов. В это время важный вклад в развитие регионологии внесла французская школа географии. Особая роль в ее становлении принадлежит Э. Реклю. В своих работах исследователь делал акцент на региональную часть, которая ярко была выражена лишь при описании некоторых стран. Наибольший вклад в развитие страноведения во Франции внес Видаль де ла Блаш. По его мнению, географические районы следует выделять на основе природных районов, тем самым отдавая приоритет природно-географическим факторам, которые больше влияют на дифференциацию территории на микроуровне. Особую роль среди последователей В. Блаша сыграл Ж. Брюн, который считал региональную географию как «синтетический итог всего предыдущего изучения всех направлений в географии [3].

Идеи зарубежных географических школ в области исследования регионов

Во второй половине XX в. большой вклад в развитие регионологии внесли зарубежные географические школы США, Великобритании, Франции и др. В начале 1950-х гг. американский исследователь В. Айзард создал новое направление в географии под названием «региональная наука». В своих работах ученый интегрировал предшествующие модели анализа систем расселения, транспортных сетей, распределение логистических систем, размещение промышленных предприятий, торговли и сферы услуг. Работы В. Айзарда положили начало большому массиву исследований тех или иных территориальных явлений в рамках школы пространственного анализа и региональной науки. Термин «регионология» стал использоваться как синтез подходов различных наук к региональным исследованиям. Предметом исследования регионологии как науки стали выступать закономерности системного эколого-географического, социально-политического и экономического функционирования территориальных социумов, формы и методы регулирования этих процессов [4]. Динамизм и многовекторность в развитии географической науки в США нашли отражение в развитии хорологии – направлении географии, изучающей местности и регионы. Основную роль в развитии данного учения внесли такие ученые как П. Джеймс, Дж. Мартин, Г. Маккарти. Защите прав субъективной точки зрения в регионологии посвящены работы американского географа Дж.Ф. Харта, который призывает к более открытому и терпимому отношению ко всем «попутчикам» региональной географии, т. е. к тем, кто идет не вполне научным и даже совсем не научным путем, но к общему и полезному для всех результату [2, с. 58].

С именами Э. Джилберта, Р. Миншулла, Дж.Х. Патерсона связаны региональные исследования в Великобритании. В качестве основы данной ветви географической



науки выступил регионализм, изучение которого привело к появлению таких подходов как бихевиористский и радикально-структуролистский. Английский географ Э. Джилберт в статье «Идея региона» рассматривал вопросы изучения отдельных регионов в широком культурном контексте, указывая, что географы не имеют исключительных прав на данную область исследования, поскольку она в не меньшей мере принадлежит сферам литературы и политики [2, с. 53]. Дальнейшее развитие взглядов на изучение регионов получило отражение в работе англичанина Р. Миншулла «Региональная география: теория и практика» (1967 г.). Одно из главных мест в его работе занимает проблема техники регионального описания. По мнению Р. Миншулла, главная особенность региональной географии – создание регионального образа, и при его создании следует пользоваться определенным числом региональных характеристик, отобранных исходя из взглядов исследователя. В работах Дж.Х. Патерсона освещены проблемы развития региональной географии в англо-американском мире. Дж.Х. Патерсон считал, что региональная география – «... это работа, где цель исследования определяется в прояснении специфической ситуации в определенной местности; работа, в которой внимание обращено на регионе ради него самого, а также населяющих его людей» [5].

В монографии французского географа П. Клаваля «Введение в региональную географию» (1993 г.) изучение регионалистики проявилось в классических формах комплексного страноведения, а также в особых формах регионально-типологического направления. Вопросами региональных исследований на рубеже тысячелетий занимаются ряд американских и западноевропейских исследователей, таких как М. Аглиетта, Х. Армстронг, Э. Гувер, Ф. Джаиратани, Т. Курчена, А. Липитца, Д. Мелвин, Р. Приер, Д. Пьер, А. Скотт, Д. Тэйлор. Большое научное значение имеют труды японских ученых. В японской науке, как и в западной, не произошло окончательного размежевания предмета исследования между экономической географией и региональной экономикой. Японские экономико-географы считают предметом своего исследования «экономическую региональную структуру», под которой, как полагает Х. Нисиока, подразумевается «региональная структура экономической деятельности, но не экономическая структура региона». Экономическая география изучает организацию, процесс формирования экономической региональной структуры. При этом важное место в теоретическом разделе японской экономической географии занимает теория размещения, которая и по сей день испытывает на себе сильное влияние А. Вебера и И. Тюнена. Подобные взгляды разделяют Х. Нисияма, К. Ямамото и др. [6].

Роль Русской географической школы в развитии региональных исследований

Огромный вклад в региональные исследования внесла русская, а впоследствии и советская географическая школа. Основоположником изучения регионов в России является В.Н. Татищев. Он выделил по масштабам исследования генеральную, краеведческую и региональную географию, в качестве объектов исследования которых выступали сетка населенных пунктов, население как производительная сила, местность, которая специализируется на тех или других видах производства, экономические пункты производства, изменения всех перечисленных выше объектов во времени [7, с. 18]. Совместно с М.В. Ломоносовым была разработана первая программа географического обследования страны, в которой широко применялся метод анкетирования. Анкета включала вопросы физической и экономической географии, а также природопользования. Впервые в России была сделана попытка систематизировать информацию о типах городов, занятиях населения, что положило начало статистическим исследованиям в государстве. Следует отметить вклад М.В. Ломоносова в изучение вопросов народонаселения.



В его работе «О сохранении и размножении российского народа» (1761 г.) были представлены конкретные меры, которые могли способствовать сохранению демографического потенциала и росту численности населения. По сути дела, это была первая попытка научного обоснования регулирования демографических процессов в стране. Большое значение в дореформенной России имели работы по районированию и статистике К.И. Арсеньева. В труде «Статистические очерки России» (1848 г.) ученый выделил на территории страны 10 пространств (районов). Для каждого района была составлена комплексная характеристика, в которой, кроме физико-географических компонентов, рассматривались аспекты заселенности территории, развития хозяйства и его специализации, обеспеченности транспортными путями. В разделе «Низменное пространство» К.И. Арсеньев исследовал Белоруссию и Литву. В их состав входили современные территории как Беларуси, так и Белорусского Полесья. Автор обращал внимание на природные особенности полесских уездов, изучал их влияние на образ жизни населения. Принципы экономического районирования страны, разработанные К.И. Арсеньевым, стремление выделить для каждого района типичные черты способствовали развитию региональных географических исследований по самому широкому спектру вопросов, в том числе касающихся и народонаселения [10]. Огромный вклад в экономико-географическое изучение Беларуси в последней четверти XIX в. внес П.П. Семёнов-Тян-Шанский. В 1882 г. под его редакцией вышел третий том из серии «Живописная Россия». Ведущим автором этого тома являлся известный белорусский общественный деятель, писатель и ученый А.Г. Киркор. Этот труд был посвящен географическому, историческому и этнографическому описанию Литовского и Белорусского Полесья. Исследователи давали оценки природным условиям и исторически сложившимся связям между природой и хозяйственной деятельностью населения, отдельными местностями и отраслями хозяйства. Большое место в работе занимает характеристика национального состава, религиозной структуры, этнографических особенностей региона. Отмечая несомненное значение труда для дальнейших региональных исследований, следует отметить недостаточную научность работы, ее преимущественно описательный характер. Тем не менее, это был первый и единственный фундаментальный труд, посвященный изучению Белорусского Полесья как географического района до распада Российской империи [11].

Взгляды советских (российских) ученых на проблемы региональной географии

На развитии географической науки в мире сказались идеи советских географов: Н.Н. Баранского, Н.Н. Колосовского, И.П. Герасимова, Ю.Г. Саушкина, В.П. Семенова-Тян-Шанского, В.М. Четыркина, И.М. Маергойза, В.А. Анучина, Э.Б. Алаева, Я.Г. Машбица и др. Н.Н. Баранский считал, что основным понятием новой экономической географии должен стать экономический район, соответственно, новое направление в экономической географии получило название районного. В СССР теоретическое обоснование региональных хозяйственных комплексов также получило развитие в работах Н.Н. Колосовского [4]. Комплексное изучение экономических районов увязывалось с административно-территориальным делением СССР. Районное направление в советской социально-экономической географии считалось основным. Оно рассматривает любую страну как целостную систему экономических районов, а каждый район как составную часть страны. Такой подход позволяет решить проблему комплексного развития хозяйства страны и каждого ее экономического района [7, с. 24]. В качестве синонима термина района употребляется термин регион; отсюда – региональный, то есть относящийся к району, районам. В последнее время термин район вытесняется термином регион, так как определение района довольно жесткое, поэтому употреблять его надо осторожно. Регион в



широком смысле рассматривается как всеобъемлющая система в разрезе «природа – население», то есть как единая территориально-социальная организация, в рамках которой выделяется три ее аспекта: природно-экологический, хозяйственно-экономический и социальный. В этой связи употребление термина регион (более эластичного) стало более частым. Кроме того, употребление термина «район» отождествлялось с терминами, обозначающими административные районы – сельские и городские [8, с. 214]. Фундаментальную основу самого представления о регионализме разработал И.П. Герасимов, который высоко оценивал значение региональной географии и исходил из того, что регионализм географической науки служит важным и сильным устоем. Ядром всех географических наук назвал Ю.Г. Саушкин регионализм, учение о районах – их формировании, развитии, перспективах, практическом значении. В работе В.А. Шальнева «Проблемы региональной географии» был рассмотрен разнообразный спектр методологических вопросов, проблем взаимоотношений между регионами, были рассмотрены аспекты регионального развития.

Последнее десятилетие XX – начало XXI вв. отличается возросшими масштабами и скоростью технологического-экономического прогресса, спецификой геополитических процессов, углублением различий социально-экономических условий жизни развитых и развивающихся стран, усложнением проблем цивилизационной культуры, усложнением структуры ойкумены и ростом виртуальности ситуаций, бурным развитием информационных технологий, ростом национальных конфликтов и терроризма. Ведущей установкой в географии становится восприятие мира как многомерного пространства со сложной системой связей и зависимостей. Российский регионалист Г.Д. Костинский считает, что базисными категориями такого пространства, составляющими основу географического мышления, становятся «пространство–место» и «территория–район». Философско-методологическое содержание этих пространственных понятий такое: пространство соответствует общему (роду), место – частному (виду), территория – целому, район – части. Иначе говоря, территория и район являются реальными объектами, а пространство и место – аналитико-синтетическими понятиями. Также среди российских географов-регионалистов в этот период времени следует выделить А.С. Макарычева, который определил дефиниции термина «регион» с различных позиций. По мнению М.Д. Шарыгина, активность и целенаправленность исследований в области регионального развития во многом зависит от арсенала используемых методов. В регионоведении широко применяются философские, общенаучные и частнонаучные методы, но главную роль играют географические. К числу наиболее конструктивных относятся методы дифференциации и районирования территории, регионов-аналогов, картографический, цикловой, цепных реакций, диффузии инноваций, геоинформационный. В совокупности с философскими (анализ и синтез, индукция и дедукция) и общенаучными (логические, математические, статистические, информационно-компьютерные) эти методы формируют надежную базу региональных исследований. В начале второго десятилетия XXI в. заслуживают внимания исследования российского географа Э.Н. Кузьбожева, который обосновал перспективы развития экономической географии и регионалистики в Российской Федерации [9, с. 33].

Развитие научных взглядов в области исследования регионов в Беларуси

Изучение социально-экономических процессов в советское время лежало в контексте территориальной организации народного хозяйства с учетом региональных особенностей страны. Работа А.А. Смолича «География Беларуси» (1923 г.) представляла собой не только описание природы, но и характеристику населения, хозяйства Белару-



си в целом и отдельных ее частей. Автором впервые было проведено районирование территории БССР и дано описание отдельных регионов (например, Белорусского Полесья). Для осуществления практического экономического районирования этнографической Беларуси А.А. Смолич в качестве систематизирующих признаков определил такие, как: плотность населения, устройство поверхности земли и характер хозяйственных связей между различными территориями через анализ товарооборота. В результате им были выделены 24 экономических района и определена специфика размещения производительных сил в каждом из них, что послужило началом региональных исследований в Беларуси [12]. Также А.А. Смоlichem в работе «Размещение населения по территории Белорусской ССР» был произведен анализ размещения и особенностей структуры населения республики, исследованы отличия в показателях плотности между районами по данным переписи 1926 г. Это явилось своеобразным фундаментом для дальнейших демографических исследований Беларуси. Изучением особенностей этнического состава населения регионов занимался Г.И. Горецкий. В статье «Национальные особенности населения БССР и белорусского населения СССР по результатам переписи 1926 г.» автор исследовал удельный вес белорусов в общей численности населения по округам. Г.И. Горецкий проанализировал пространственные закономерности размещения белорусского этноса, при этом выявив тенденцию его увеличения по мере движения с севера и юга к центру. В работе дана характеристика особенностей расселения белорусов в СССР за пределами Беларуси [13]. Одним из первых демографических исследований регионов Беларуси является работа Б.Я. Смулевича «Заболеваемость и смертность в городах и местечках БССР» (1928 г.). В ней был осуществлен анализ демографических проблем с социально-гигиенической, экономической и социологической точек зрения [14]. Особенности региональных систем расселения изучал Н.В. Азбукин. В работе «Населенные местности Западной Белоруссии» (1927 г.) ученый подробно рассмотрел местечки как промежуточную форму между городом и деревней, их функции, специфику хозяйственной деятельности. Также Н.В. Азбукин отразил в своем исследовании характерные черты развития народонаселения Западной Белоруссии – аграрное перенаселение, безработицу в городах, высокий уровень эмиграции. Данный труд послужил основой для дальнейших демографических исследований региона после вхождения данной области в состав БССР [15]. Формированию комплексного подхода в географических исследованиях способствовало решение кафедры географии Инбелкульта в 1927 г. о создании картографической картотеки с целью полного географического описания территории Беларуси. В рамках этой работы в 1928 г. была организована специальная экспедиция для изучения экономической географии Белорусского Полесья. Основным результатом работы данной экспедиции заключался в получении сведений по эффективности мелиоративных работ, проведенных на Полесье И.И. Жилинским во второй половине XIX в. Стоит заметить, что в начале 30-х гг. XX в. работы по географическому изучению регионов Беларуси были практически прекращены.

После Второй мировой войны региональные географические исследования выполнялись в разрезе существовавших тогда административно-территориальных единиц. Более основательные исследования по социально-экономическому изучению регионов БССР были проведены в начале 1960-х гг. А.Г. Лисом, который провел экономическое районирование республики без учета ее административного деления. Границы выделенных экономических районов не совпадали с границами областей. Такой подход объяснялся тем, что областное административно-территориальное деление БССР экономически было более приспособлено к сельскохозяйственным, чем к общеэкономическим задачам. По мнению А.Г. Лиса, общеэкономические связи региональных центров формируются по фактически



сложившимся территориальным комплексам, что не всегда соответствует административному делению территории. В основу выделения экономических районов были положены следующие районообразующие факторы: специализация промышленных комплексов; топливно-энергетическая база отдельных частей республики; конфигурация транспортной сети; природные и трудовые ресурсы; географическое положение отдельных территориальных частей республики. На основе вышперечисленных факторов ученый выделил в Беларуси четыре экономических района: Центральный, Юго-Восточный, северо-восточный, Западный [1, с. 359–360].

Достаточно широкое отражение региональные исследования нашли в области вопросов географии населения. В работе Б.А. Манак «Региональные особенности проблем народонаселения» (1971 г.) впервые в республике рассмотрены особенности региональных проблем народонаселения. На примере Витебской области исследовались особенности естественного и миграционного движения, режим воспроизводства населения. Впервые было проведено районирование территории по типам плотности населения. Б.А. Манак разработала функционально-количественную классификацию городских поселений Витебской области, определила перспективы развития каждого типа поселений. Получили научную интерпретацию особенности сельского расселения Северной Беларуси, обусловленные социально-экономическими, историческими и природными факторами [16].

Одним из первых исследуемых регионов республики, территория которого располагалась в пределах нескольких областей, явилось Белорусское Полесье. Интенсивное научное исследование его связано с началом комплексной мелиорации земель в регионе. Президиумом Академии наук БССР было принято решение о периодическом издании специального межведомственного сборника «Проблемы Полесья». В первом выпуске помимо физико-географических характеристик региона освещались вопросы динамики городского и сельского населения, рассмотрены территориальные особенности показателей плотности, дана характеристика структуры занятости населения. Также была обоснована территориальная составляющая Белорусского Полесья – границы региона определялись в пределах бассейна реки 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. К сожалению, в последующих номерах сборника вопросы социально-экономического развития Белорусского Полесья не нашли отражения, что не способствовало его комплексному изучению [17].

Дальнейшее изучение социально-экономических процессов в регионе было представлено в работе «Белорусское Полесье: проблемы развития и размещения производительных сил» (1983 г.) под ред. С.И. Сидора, которая стала первым комплексным региональным исследованием в Беларуси, границы объекта которого не совпадают с административными. Авторы сосредоточили основное внимание на трудоресурсном потенциале региона, экономических категориях, связанных с проблематикой развития и размещения производительных сил. В число основных блоков исследования вошла и демографическая подсистема, включившая в себя вопросы численности населения, естественного прироста, миграций и др. При определении территориальной составляющей Белорусского Полесья использовался гипсометрический подход (высота до 200 м), совместимый с административными районами, в результате чего пространственная составляющая изучаемого объекта несколько сузилась, и некоторые типичные полесские районы (Гомельский, Добрушский, Жлобинский) не были включены в состав региона [18].



Трансформация политической, социально-экономической системы, изменение взглядов на роль и значение мелиорации земель в Белорусском Полесье заметно ослабили внимание исследователей к изучению данного региона, прежде всего с точки зрения вопросов народонаселения и трудовых ресурсов. Вопросы географии населения по-прежнему изучаются в разрезе областей и районов. В этой связи заслуживает внимание труд В.С. Саковича «Белорусское село в 70–90-е годы: миграция населения, трудовые ресурсы» (1997 г.). Автор исследовал тенденции изменения территориальной организации производительных сил в Белорусском Полесье, влияние мелиоративных мероприятий на развитие сельских населенных пунктов, формирующиеся городские агломерации в регионе. В работе уделяется внимание последствиям аварии на ЧАЭС, ее воздействию на социально-демографическое развитие сельской местности во второй половине 80-х – 90-х гг. XX в. В.С. Саковичем были определены особенности миграционных процессов в загрязненных районах, проанализирована динамика численности сельских населенных пунктов, показатели рождаемости, смертности, заболеваемости населения пострадавших регионов [19]. Идея географической вариантности развития регионов Республики Беларусь нашла свое отражение в качественно новых региональных исследованиях, выполненных Е.А. Антиповой и Б.А. Манак, которые обусловлены необходимостью совершенствования социально-экономических программ регионального развития. Авторами проанализированы особенности и перспективы развития Белорусского Полесья в целом, проанализированы трансформационные процессы в послечернобыльский период, изменения в этническом составе населения во второй половине XX в., национальный состав населения крупных и средних городов, разработана этнодемографическая типология районов, типология городских и сельских поселений по уровню естественного прироста или потерь населения [20].

Заключение

Проведенный анализ эволюции научных взглядов на развитие региональных исследований позволил выделить основные географические школы, внесшие существенный вклад в вопросы изучения регионов – американскую, английскую, немецкую, советскую, французскую, что способствовало систематизации взглядов на данную проблематику и учету специфики исследований в разных исторических условиях. Социально-экономическое изучение регионов Беларуси проводилось преимущественно в разрезе областей и районов, исходя из административно-территориального деления страны. Появление объективных предпосылок оптимизации региональной политики государства ставит перед исследователями задачу комплексного изучения регионов, пространство которых находится в пределах нескольких областей и не совпадает с границами существующих административно-территориальных единиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириенко, Е.Г. Социально-экономическая география Республики Беларусь : учеб. пособие / Е.Г. Кириенко. – Минск : Аверсэв, 2003. – 400 с.
2. Мироненко, Н.С. Страноведение: Теория и методы : учеб. пособие для вузов / Н.С. Мироненко. – Москва : Аспект Пресс, 2001. – 268 с.
3. Митин, И.И. Французская школа географии человека [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://imitin.at.tut.by/fwg4.htm>. – Дата доступа : 28.02.2010.



4. Мишуров, С.С. Основы регионологии / С.С. Мишуров, В.Н. Щуков [Электронный ресурс]. – Иваново, 2003. – Режим доступа : [http://window.edu.ru / window_catalog/paf2txt?p_id=12702](http://window.edu.ru/window_catalog/paf2txt?p_id=12702). – Дата доступа : 24.02.2010.
5. Paterson, J.H. Writing regional geography: problems and progress in the Anglo-American realm / J.H. Paterson [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access : http://books?id=_x1wQxa_DgMC&Pg=PA. – Date of access : 25.02.2010.
6. Региональная экономическая политика в Японии [Электронный ресурс] – 2010. – Режим доступа : <http://nauka-shop.com>mod/ shop / product / D/ 3277/>. – Дата доступа : 10.03.2011.
7. Сідор, С.І. Тэорыя сацыяльна-эканамічнай геаграфіі : курс лекцый / С.І. Сідор, Г.С. Смалякоў. – Мінск : БДУ, 2001. – 111 с.
8. Алаев, Э.Б. Социально-экономическая география: понятийно-терминологический словарь / Э.Б. Алаев. – Москва : Мысль, 1983. – 350 с.
9. Кузьбожев, Э.Н. Экономическая география и регионалистика : учеб. пособие / Э.Н. Кузьбожев, И.А. Козьева, М.Г. Световцева. – Москва : Юрайт, 2011. – 540 с.
10. Арсеньев, К.И. Статистические очерки России / К.И. Арсеньев [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург, 1848. – Режим доступа : <http://www. gold biblioteka. ru / book 1800 /.../ 52. php>. – Дата доступа : 29.04.2011.
11. Живописная Россия / под ред. П.П. Семенова [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург – Москва, 1882. – Т. 3, ч. 1. – Литовское Полесье, ч. 2. Белорусское Полесье. – Режим доступа : <http://www. alib. ru / bs. php4?uid>. – Дата доступа : 29.04. 2011.
12. Смоліч, А.А. Геаграфія Беларусі / А.А. Смоліч. – 4-е выд. – Минск : Беларусь, 1993. – 382 с.
13. Гарэцкі, Г.І. Нацыянальныя асаблівасці насельніцтва БССР і беларускага насельніцтва СССР паводле перапісу 1926 г. / Г.І. Гарэцкі // Гаўрыла Гарэцкі. Выбранае. – Мінск, 2002. – С. 123–146.
14. Смулевич, Б.Я. Заболеваемость и смертность населения городов и местечек БССР / Б.Я. Смулевич. – Минск : Изд-во ЦСУ и НКЗ БССР, 1928. – 105 с.
15. Азбукин, Н.В. Населенные местности Западной Белоруссии / Н.В. Азбукин // Западная Белоруссия : сб. ст. – Минск, 1927. – С. 171–194.
16. Манак, Б.А. Региональные особенности проблем народонаселения : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.02 / Б.А. Манак ; Белорус. гос. ун-т. – Минск, 1971. – 18 с.
17. Проблемы Полесья / С.Х. Будыка [и др.] ; НАН БССР; под общ. ред. С.Х. Будыка. – Минск : Наука и техника, 1972. – Вып. 1. – 452 с.
18. 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.
19. Сакович, В.С. Белорусское село в 70–90-е годы: миграция населения, трудовые ресурсы / В.С. Сакович ; науч. ред. М.П. Костюк – Минск : НАН Беларуси, Ин-т истории, 1997. – 170 с.
20. Манак, Б.А. Полесский регион Беларуси: этнодемографический портрет / Б.А. Манак, Е.А. Антипова // Геаграфія: праблемы выкладання. – 2007. – № 1. – С. 3–12.

S.V. Korjenevich. Region as Object Economic-Geographical Research

The article is devoted to one of the most urgent problems of social and economic geography - regional geographic research. The author analyzes the different approaches of leading scientists to the study regions. The role of the leading schools in the geographic study of the issue - the American, British, German, Soviet, French. The paper presents a detailed analysis of the development of scientific views on the study of the regions of Belarus on the example of Belarusian Polesye.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 12.09.2013



УДК 502; 574 /47. 9245/

С.А. Тарихазер

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЭКЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ ЧАСТИ БОЛЬШОГО КАВКАЗА (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО СКЛОНА)

Было установлено, что современные морфоструктуры азербайджанской части Большого Кавказа (на северо-восточном склоне), сформировавшиеся в неотектоническом этапе, в результате тектонических подвижек создав резкую высотную поясность, сыграли важную роль в направленности и интенсивности развития на территории экзодинимических процессов.

По направленности и интенсивности экзодинимических процессов, происходящих на исследуемой территории, а также по морфотектоническим и морфоструктурным особенностям территории здесь выделяются три основные зоны, отражающие закономерности отношений (связей) развития экзодинимических процессов с морфоструктурами.

Введение

Современные экзодинимические процессы на северо-восточном склоне азербайджанской части Большого Кавказа характеризуются большим разнообразием и дифференциацией, что связано с особенностями неотектонических движений, литологическим составом слагающих горных пород, большой амплитудой современного рельефа, климатом и т.д. Современный рельеф Большого Кавказа, особенно его северный склон, значительно переработан экзодинимическими процессами, где гипсометрическое положение и внешний облик его созданы новейшими плиоцен-четвертичными тектоническими движениями.

Анализ региональных морфоструктур Большого Кавказа, составленная картограмма морфоструктур и детальное изучение геологии горного рельефа [2, с. 28; 3, с. 34; 12, с. 35] позволяют проследить закономерности развития геодинамических процессов, установить взаимосвязь и обусловленность морфоскульптур с морфоструктурами.

Сложные, гетерогенно и гетерохронно построенные морфоструктуры в пределах северо-восточного склона Большого Кавказа создают сильно дифференцированный горный рельеф. Рельеф со сложным морфотектоническим строением и контрастными высотными поясами является направляющим и контролирующим фактором, определяющим закономерное проявление экзодинимических процессов, направление их развития, пространственное распространение экзогенно обусловленных форм рельефа – морфоскульптур (рисунок 1).

Современная эндогенно обусловленная геодинамическая модель Большого Кавказа, обусловленная сложными и длительными складчато-блоково-шарьяжными подвижками, привела к формированию сложных по генезису и по возрасту региональных, субмеридианальных, субширотных морфоструктур, представленных структурно обусловленными формами рельефа. Именно эти обусловленности и разнообразный по денудационной устойчивости комплекс горных пород слагающие морфоструктуры и выделенные на поверхности в различных диапазонах абсолютных высот, а также последующие изменения физико-географических условий определили основные закономерности проявления и протекания экзодинимических процессов, которые в конечном итоге привели к формированию современного, интенсивно расчлененного, сильно дифференцированного рельефа Большого Кавказа [1, с. 4; 2, с. 26; 3, с. 32; 4, с. 143; 5, с. 52; 6, с. 17; 7, с. 26].



I. Складчатые горы, плато и равнины позднеальпийских краевых и межгорных прогибов.

A. Слабоактивные в новейшем этапе аккумулятивные низменности и равнины с преобладанием прямого тектонического рельефа.

1. Морские аккумулятивные, слабонаклонные, террасированные, слаборасчленённые равнины на нижне-среднечетвертичном, слабо деформированном субстрате. 2. Аллювиально-пролювиальные, слабонаклонные, слаборасчленённые на нижне-среднечетвертичном, слабо деформированном субстрате. 3. Аллювиально-пролювиальные, выпуклые, интенсивно расчленённые на нижне- и среднечетвертичном, слабо деформированном субстрате.

Б. Менее активные в новейшем этапе денудационно-аккумулятивные плато и равнины, частично с обращённым рельефом.

4. Предгорные моноклиальные, интенсивно приподнятые, умеренно расчленённые равнины с мощным флювиогляциально-аллювиально-пролювиальным покровом на мезозойском, палеоген-неогеновом, моноклиально деформированном субстрате. 5. Предгорные моноклиальные, высокоприподнятые равнины, среднерасчленённые с мощным флювиогляциально-аллювиальным верхнеплиоцен-нижнечетвертичным покровом на мезозойском, палеоген-неогеновом, осадочном деформированном субстрате.

В. Активные в новейшем этапе среднегорья и низкогорья с преобладанием прямого тектонического рельефа.

6. Антиклинальные низкие горы, интенсивно расчленённые, сложенные сильно деформированным осадочным нижним и верхним плиоценом. 7. Синклиальные низкогорья и котловины,



умеренно расчленённые, местами четвертичным пролювиально-аллювиальным покровом на неогеновом осадочном субстрате. 8. Моноклинальные средние горы, интенсивно расчленённые, сложенные сильно деформированным флювиогляциально-пролювиальными отложениями верхнего плиоцена.

II. Позднеальпийские эпигеосинклинальные складчатые и складчато-глыбовые горы.

9. Синклинорные, горст-синклинорные высокие и средние горы, умеренно расчленённые, сложенные деформированным осадочным мезозоем. 10. Горст-синклинорные высокие горные массивы и плато, интенсивно расчленённые, сложенные глыбовым, сильно деформированным осадочным мезозоем. 11. Синклинорные среднегорные массивы, плато и котловины интенсивно и умеренно расчленённые, сложенные глыбовым, слабо деформированным осадочным мезозоем и частично палеогеном. 12. Горст-синклинальные средние и низкие, наложенные горные плато и возвышенности, средне расчленённые, сложенные сильно деформированным осадочным неогеном.

A. Активные в новейшем этапе с преимущественно обращённым рельефом.

13. Горст-синклинальные средние горы, интенсивно расчленённые, сложенные интенсивно глыбовым деформированным поздним мезозоем.

Б. Менее активные в новейшем этапе с прямым рельефом.

14. Грабен-синклинальные, среднегорные и низкогорные котловины и плато, интенсивно расчленённые, сложенные сильно деформированным осадочным поздним мезозоем.

В. Активные в новейшем этапе преимущественно с прямым тектоническим рельефом.

15. Антиклинорные и горст-антиклинорные высокие горы, интенсивно расчленённые, сложенные глыбовым, сильно деформированным осадочным мезозоем. 16. Антиклинорные средние и низкие горы, интенсивно расчленённые, сложенные сильно деформированным вулканогенно-осадочным мезозоем, и частично, палеоген-неогеном. 17. Антиклинальные средние и низкие горы, интенсивно расчленённые, сложенные сильно деформированным осадочным поздним мезозоем, частично палеоген-неогеном. 18. Антиклинальные низкие горы, интенсивно расчленённые, сложенные деформированным осадочным мезозоем, частично палеоген-неогеном.

Рисунок 1 – Геоморфологической карта-схемы северо-восточного склона Большого Кавказа

Результаты исследований

В пределах исследуемой территории по морфотектоническим и морфоструктурным особенностям, посредством которых определяется характер, направленность и интенсивность экзодинамических процессов, четко выделяются три морфотектонические зоны: 1) узкая, опрокинутая песчано-сланцевая, грабен-синклинорная зона чешуйчато-надвиговых морфоструктур южного склона Большого Кавказа; 2) блоковая, известняково-песчаная, наложенная горст-синклинорная зона шарьяжно-надвиговых морфоструктур Бокового хребта; 3) сильно расчлененная, веерообразно расширяющаяся и подвергающаяся погружению зона шарьяжно-надвиговых морфоструктур юго-восточной оконечности Большого Кавказа, западной границей которой можно считать Западно-Каспийскую зону разломов.

Опрокинутые на юг песчано-сланцевые комплексы пород, слагающие высоко приподнятые над уровнем моря (3000–3500 м) новейшими тектоническими движениями морфоструктуры Туфанской зоны (от реки Мазымчай на западе до рек Гейчай-Вандамчай на востоке) определили своеобразие проявления экзодинамических процессов, их направленность и интенсивность. Туфанская и Загатало-Говдагская крупные складчато-блоковые морфоструктуры и морфоструктуры более низкого ранга южного склона Главного Кавказского хребта обусловлены субмеридианальными и субширотными разломами надвигового типа. Эти морфоструктуры, имея круто обрывающиеся



на юг по ограничивающим их разломам склоны, обусловили интенсивное развитие процессов и привели к формированию сильно расчлененного современного рельефа южного склона Большого Кавказа, где преобладающими являются гравитационные и водно-эрозионные геодинамические процессы, которые образуют скальные обнажения, обвалы, оползни, крутые уступы, осыпи, россыпи, рытвины, борозды, речные долины и другие линейные эрозионные элементы рельефа.

С вхождением этой зоны в более высокие холодные слои тропосферы, в моделировке и переработке современного рельефа заметную роль приобрела деятельность древних и современных ледников и снежников. На водораздельных и приводораздельных участках гор широко развиты древнеледниковые, экзарационные (троговые долины, кары, цирки) и аккумулятивные (морены) формы рельефа.

Современно-гляциальный тип морфоскульптуры на северо-восточном склоне Большого Кавказа развит на вершинах Шахдага (4243 м), Базардюзю (4466 м), Туфандага (4191 м), имеющих современные ледники, которые занимают площадь 6.6 км² [8, с. 20]. Современный ледниковый язык горы Туфандаг, длиной 1900 м и шириной 600 м, спускается по северному склону; по юго-восточному склону горы Базардюзю ледник спускается двумя языками, длиной 1440 м и шириной 900 м от отметки 4350 м [4, с. 136; 9, с. 18]. Характерными экзарационными формами являются обширные кары, цирки, зубчатые вершины, плоские слабонаклонные (Шахдаг, Базардюзю) нагорные плато, расположенные выше 4000 м. Моренные накопления, размытые подледниковыми и снеговыми водами, являются аккумулятивными формами рельефа гляциального происхождения. На низких и сглаженных водораздельных пространствах (горы Бабадаг, Годжадарабаши), седловинах и нагорных плато развит чехол элювия. Сохранность в современном рельефе нивально-ледниковых форм в пределах Главного и Бокового хребтов различна и обусловлена литологическими и структурными особенностями слагающих территорию пород. Развитие литологических комплексов с различной устойчивостью к денудации и выветриванию способствует слабому отражению в современном рельефе экзарационных форм. Многие кары и цирки четвертичного оледенения в настоящее время имеют вид эрозионных воронок. Троговые долины, их плечи, склоны и дно из-за интенсивного выветривания и денудации не сохранили первичных следов движения ледников. В районе гор Шахдаг, Базардюзю, Гызылгайя и другие часто наблюдаются следы снежных лавин, которые разрушают склоны, по лавинным лоткам выносят рыхлообломочный материал и эту массу отлагают у подошвы склонов в виде лавинных конусов [8, с. 22]. В высокогорном поясе, на высоте 3000 м и выше интенсивно развиты солифлюкция (Гызылгаинское и Шахдагское плато, в долине реки Шахнабадчай) и морозное выветривание.

Большие диапазоны абсолютных и относительных высот и уклонов поверхности рельефа, узость хребта, обусловленная сильной сжатостью морфотектонических блоков, наличие крупных речных долин в крест простирацию секущих морфоструктур с древовидно-перистым типом рисунка речной сети, в условиях широкого развития песчано-сланцевых комплексов и дробления их тектоническими нарушениями разного порядка и ориентации, сделали Главный Кавказский хребет интенсивно расчлененным районом всего Кавказа в целом. Совокупность благоприятных, морфотектонических, климатических, геоморфологических, литологических условий для протекания гравитационно-флювиальных процессов на оголенных, крутых, сильно эродированных склонах, переработанных доледниковой, ледниковой и послеледниковой денудацией, создали идеальные предпосылки для доминирования здесь таких процессов, как селевые, которые часто повторяются и приводят к катастрофическим последствиям. Наличие этих



условий привело к тому, что во всей системе Альпийской шовной зоны этот район считается одним из наиболее селеопасных [4, с. 129; 9, с. 19; 13, с. 25]. Являясь комплексным природным явлением, сель и созданные ей формы повсеместно находят свое отражение в рельефообразовании. В пределах высокогорья – это рытвины, борозды, промоины, осыпи, конуса выноса линейно-эрозионных образований. В среднегорье – боковые конуса в устьях притоков, осыпи на склонах, широкое развитие разрыхленной массы оползней. В пределах низкогорья (аридный пояс) – оползни, конуса выноса оврагов и балок интенсивно расчлененного бедлендового рельефа. Отсюда следует, что селевой процесс обусловлен орографическими, гипсометрическими, геолого-тектоническими, климатическими особенностями и оказывает влияние на перераспределение боковой и глубинной эрозии. Селевые потоки часто повторяются в бассейнах рек Гильгильчай, Атачай, Шабранчай. Следы грязевых и грязекаменных селей в виде селевых валов, грязевых масс сохранились в широких поймах рек Гильгильчай, Атачай и Вельвеличай. Селевые очаги типа эрозионных воронок характерны для высокогорных частей бассейнов рек Гудиалчай, Вельвеличай, Гусарчай. Селевые образования бассейнов рек Гильгильчай, Атачай, Шабранчай приурочены к оползневым и оползне-селевым потокам.

Совершенно другими морфотектоническими условиями характеризуются направленность и обусловленность геодинамических процессов на северо-восточном склоне Большого Кавказа. Рельеф со складчато-шарьяжно-блоковым строением горст-антиклинорных, горст-синклинорных, грабен-синклинорных хребтов и наложенных котловин предопределил своеобразие гравитационных и флювиальных процессов. Речные долины, пересекающие высоко приподнятую горст-синклинорную Шахдаг-Хызынскую морфоструктуру, создают в рельефе своеобразные условия для прохождения экзогенных геоморфологических процессов. Крутые, отвесные склоны плато и хребтов характеризуются отрицательным балансом рыхлообломочного материала. Большая протяженность речных долин и их блоково-каскадное строение, расположение селеобразующих очагов вне зоны выпадаемых максимальных атмосферных осадков относительно снижают возможность формирования в этих бассейнах рек частых сильных селевых потоков. На крутых обрывистых склонах Шахдагского и Гызылгаинского плато интенсивно происходит «сухая» гравитационная (обвалы, камнепады) (рисунок 2) транспортировка грубообломочных пород, которые у подножий склонов образуют коллювиальные шлейфы. Преобладающими процессами гравитационного порядка в этом районе являются различные типы оползней, представленные площадными оползнями, оползнями-потоками и оползнями-обвалами (рисунок 3). Оползневые потоки, стекающие в виде полужидкой грязевой массы, широко развиты в бассейнах рек Вельвеличай, Гильгильчай, Атачай, а также на Гильгильчайском грабене, на склонах Нохурларской, Сохюбской, Ерфинской, Халтанской грабен-синклинальных котловин. Площадные оползни (деляпсивные и детрузивные) широко развиты в бассейнах рек Гусарчай, Гудиалчай, Гарачай, Агчай, Укорчай и другие, которые характеризуются слабым нарушением текстурных особенностей смещенных блоков, раздробленными гравитационными трещинами [1, с. 18; 10, с. 23; 11, с. 240].



**Рисунок 2 – Обвал в селе Аладаш Гусарского района
(снимок 17 сентября 2011 г)**



**Рисунок 3 – Оползень в селе Аладаш Гусарского района
(снимок 14 августа 2010 г)**

Оползни-обвалы характерны для склонов, сложенных снизу глинистыми отложениями, а сверху – мощными известняково-песчаниковыми, крепко сцементированными плотными породами, избирательно подвергающимися процессам денудации. Такие оползни наблюдаются в бассейне реки Тагирджалчай. Для бассейнов же рек Гусарчай, Гудиалчай, Гарачай, Агчай в зоне пересечения с Боковым хребтом, сложенного известняками и песчаниками, сильно раздробленного тектоническими нарушениями, преобладающими формами являются каменно-глыбовые россыпи – осыпи (рисунок 4).



Рисунок 4 – Осыпь в селе Аладаш Гусарского района
(снимок 17 сентября 2011 г)

Для поверхности синклинальных, высоко приподнятых плато Шахдага и Гызылгая характерны проявления нивальных морфоскульптур, представленных в основном солифлюкционными буграми и оплывинами, создающих пятнистый горно-тундровый рельеф. На северо-восточном склоне Большого Кавказа в районе вершины Шахдаг (4243 м), на абсолютной высоте 3500–3600 м имеет место крупный оползень-солифлюкция, площадью 0,5–0,6 км². Поверхность оползня-потока бугристая, движение идет медленно [4, с. 138].

Гусарская наклонная равнина, вовлеченная в интенсивное тектоническое поднятие в четвертичное время, сложенная мощной толщей флювиогляциального, валунно-галечникового комплекса отложений верхнеабшеронского возраста, является зоной широкого развития аккумулятивных морфоскульптур, например, речных террас, количество которых в долинах рек Самур, Гусарчай и Гудиалчай достигает до пятнадцати.

Специфическими особенностями проявления экзодинамических процессов выделяется южный склон юго-восточной оконечности Большого Кавказа к востоку от реки Гейчай, который в рельефе в основном представлен горст-антиклинальным складчато-блоковым Ниалдагским и горст-синклинальным Говдагским хребтами, сложенными верхнемезозойскими осадочными, вулканогенно-осадочными комплексами пород, а также Лагичской, и Айричайской грабен-синклинальными котловинами. К востоку от реки Гирдыманчай морфотектоническое строение рельефа представлено низкими, интенсивно- и среднерасчлененными хребтами, грядами и котловинами, сложенными в основном глинистыми комплексами пород неоген-плиоценового возраста. К этой же зоне приурочены более сложные по генезису Баскальский, Гызмейданский и другие верхнемеловые тектонические покровы, которые, создавая безкорневые, чешуйчатые, мало амплитудные морфоструктуры, обусловили интенсивное развитие гравитационных процессов, особенно оползней [1, с. 21; 5, с. 50; 6, с.17; 7, с. 22; 13, с. 27].

Резкие понижения рельефа, увеличение аридизации к востоку от реки Гирдыманчай накладывают отпечаток на характер и направленность экзогенных процессов. Здесь на склонах неглубоких речных долин, наложенных гряд и котловин, доминируют оползневые процессы, предопределенные, главным образом, литологическими особенностями. В пределах среднегорья, на северных и южных склонах Ниалдагского и Говдагского хребта такие гравитационные формы, как осыпи и россыпи, не являются исключением. К востоку от реки Пирсаатчай основными формами рельефа экзогенеза яв-



ляются глинистый карст и бедленд, развитие которых предопределено аридным климатом и распространением комплексов глинистых отложений неоген-плиоцена и разновозрастных грязевулканических брекчий.

Заклучение

Из вышеизложенного следует, что складчато-блоковый, ступенчатый сильно дифференцированный характер фундамента рельефа и специфические морфоклиматические особенности исследуемой территории являются основными факторами в развитии морфо- и гидродинамических процессов. Эти особенности еще большее значение приобрели в период поздне-миоценово-плиоценовой фазы орогенеза. Преобладание в новейшее время роли поперечных блоковых подвижек над продольными создало более благоприятные условия для развития гравитационных, эрозионно-денудационных, гидродинамических процессов и формирования морфоскульптур, которые в основном приурочены к линиям поперечных разрывных нарушений и морфоструктурных узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарихазер, С.А. Разработка методики дешифрирования морфоскульптур горных стран (на примере северо-восточного склона Большого Кавказа) : автореф. канд. дис. / С.А. Тарихазер. – Баку, 1997. – 29 с.
2. Марданов, И.Э. Морфоструктурная обусловленность экзодинамических процессов на примере азербайджанской части Большого Кавказа / И.Э. Марданов, А.А. Микаилов, Э.К. Ализаде, С.А. Тарихазер // Известия АН Азербайджана. Серия науки о Земле. – 1996–1997. – № 1–6. – С. 24–31.
3. Ализаде, Э.К. Закономерности морфоструктурной дифференциации горных сооружений восточного сегмента центральной части Альпийско-Гималайской шовной зоны (на основе материалов дешифрирования КС) : автореф. докт. дис. / Э.К. Ализаде. – Баку, 2004. – 53 с.
4. Ализаде, Э.К. Экзоморфодинамика рельефа гор и ее оценка / Э.К. Ализаде, С.А. Тарихазер. – Баку, 2010. – 236 с.
5. Ализаде, Э.К. Динамика изменения структуры опасных стихийно-бедственных явлений азербайджанской части Большого Кавказа в условиях глобальных изменений / Э.К. Ализаде, С.А. Тарихазер // Устойчивое развитие горных территорий в условиях глобальных изменений : избран. материалы VII междунар. конф. – Владикавказ, 2010. – № 3 (5). – С. 49–56.
6. Ализаде, Э.К. Изменение структуры опасных морфогенетических процессов и их воздействие на горные геоморфосистемы (на примере северо-восточного склона Большого Кавказа) / Э.К. Ализаде, С.А. Тарихазер // Известия НАН Азербайджана. Серия науки о Земле. – 2010. – № 2. – С. 16–23.
7. Ализаде, Э.К. Некоторые характерные особенности эколого- и инженерно-геоморфологической оценки северо-восточного склона Большого Кавказа (в пределах Азербайджана) / Э.К. Ализаде, С.А. Тарихазер // Географический Вестник. – 2012. – № 3 (22). – С. 20–31.
8. Будагов, Б.А. Нивально-гляциальная морфоскульптура / Б.А. Будагов // Рельеф Азербайджана. – Баку : Изд-во «Элм», 1993. – С. 20–22.
9. Марданов, И.Э. Основные закономерности развития морфоскульптур Юго-Восточного Кавказа / И.Э. Марданов // Известия АН Азерб. ССР. – 1980. – № 2. С. 17–21.



10. Будагов, Б.А. Гравитационная морфоскульптура / Б.А. Будагов // Рельеф Азербайджана. – Баку : Изд-во «Элм», 1993. – С. 22–28.

11. Тарихазер, С.А. Особенности проявления экзодинамических процессов на различных высотно-геоморфологических поясах (на примере Шахдаг-Гызылгаинского массива) // С.А. Тарихазер // Труды ГО Азербайджана. – Баку, 2006. – Т. X. – С. 238–242.

12. Ализаде, Э.К. Структурно-геоморфологические исследования северного склона Юго-Восточного Кавказа методами дистанционного зондирования / Э.К. Ализаде, А.А. Микаилов // Труды фонда ИГ АН Азерб. ССР. – Баку, 1985. – № 1. – С. 33–36.

13. Марданов, И.Э. Об особенностях заложения рисунков гидрографической сети и ее связь с разрывной тектоникой в пределах Юго-Восточного Кавказа / И.Э. Марданов, Э.К. Ализаде, С.А. Тарихазер // Известия. Серия науки о Земле. – Баку, 1998. – № 3. – С. 20–29.

S.A. Tarikhazer Features of Development Exodynamic Processes in Azerbaijan Part of Major Caucasus (on the Example of the North-Eastern Slope)

It was found that the modern morphostructures of the Azerbaijanian part of the Major Caucasus (in the north-eastern slope), formed in the neotectonic stage, as a result of tectonic movements creating a sharp high-altitude zone, played an important role in the direction and intensity of development the exodynamic processes on territory.

By direction and intensity of exodynamic processes occurring in the study area, as well as morphotectonic and morphostructural features of the territory the three main zones is divided, reflecting the regularities of relationships (links) of development of exodynamic processes with morphostructures.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 11.06.2013



УДК 528.92:004

С.М. Токарчук, С.С. Романюк

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИРОДООХРАННЫЙ АТЛАС ИВАНОВСКОГО РАЙОНА

В статье рассматривается опыт создания электронного природоохранного Атласа Ивановского района. Приводится структура и общая характеристика тематического содержания Атласа, примеры текстового, картографического, иллюстративного и табличного содержания Атласа. Указываются основные сведения о содержании вспомогательной и основной частей Атласа.

Введение.

На современном этапе геоинформационные системы (ГИС) находят все большее применение в различных направлениях деятельности человека. Разработка и создание ГИС проводится чаще всего в разрезе административных единиц (стран, областей). Использование административных границ имеет ряд преимуществ: возможность получения статистических данных, существование четко определенных единиц исследования для проведения оценочных работ, возможность практического использования результатов исследования и др.

Административно-территориальный подход доминирует не только в социально-экономических, но и физико-географических, а также геоэкологических исследованиях. Однако чаще всего работы проводятся на региональном (область, страна) уровне. Необходимо отметить, что в научных исследованиях недостаточное внимание уделяется административным районам как объектам исследования, в результате чего при проведении подобных работ приходится опираться на методические разработки для более крупных территорий и адаптировать их применительно к районам.

Создание электронных атласов (комплексное цифровое атласное картографирование) является одним из наиболее эффективных методов пространственного анализа. Электронные атласы включают основные аспекты системного подхода в географии и являются идейной основой создания ГИС. Электронные атласы могут быть самыми разнообразными (комплексными, геоэкологическими, социально-экономическими и др.). Электронное атласное картографирование позволяет создавать на основе базового ГИС-проекта самые разнообразные продукты, а также сочетать картографические изображения с другим иллюстративным материалом (графиками, диаграммами, фотографиями), табличными данными, текстовыми описаниями и др.

Во всем мире цифровому и электронному картографированию уделяют большое внимание и вкладывают в это значительные средства. Например, в США более 80% пространственной информации представлено в виде цифровых карт и ежегодно подготавливается более тысячи новых баз данных различного назначения. К сожалению, в Беларуси электронное картографирование находится на начальном этапе.

Разработка электронного природоохранного атласа Ивановского района (далее Атласа) основывается на методике создания электронного геоэкологического атласа Брестской области [1], а также методических и практических разработках, представленных в научной литературе [2; 3].

Структура и общая характеристика Атласа. Электронный природоохранный атлас Ивановского района сконструирован в среде *.chm. Он имеет сложную многоуров-



невую структуру. В целом, в Атласе можно выделить две части: (1) вспомогательная; (2) основная (рисунок 1).



Рисунок 1 – Структура природоохранного атласа Ивановского района

Как уже отмечалось выше, электронные атласы существенно отличаются от печатных. Чаще всего в электронных атласах присутствуют не только карты и другие иллюстрации, но и текстовый материал, что характерно и для данного атласа. Можно выделить следующие составные части Атласа: (1) текстовые описания, (2) карты и картосхемы, (3) иллюстративный материал (графики, диаграммы, фотографии), (4) табличный материал.

Текстовый материал в электронном атласе выполняет несколько функций:

- 1) описательную (описание концепции Атласа, общая характеристика Атласа, описание истории формирования территории Ивановского района и т.д.),
- 2) справочно-информационную (справочная информация о структуре сети ООПТ Беларуси, согласно законодательству, о структуре и содержании Красной книги и т.д.),
- 3) аналитическую (анализ основных карт, картосхем и таблично-иллюстративного материала, представленного в Атласе).

Картографический материал. В Атласе картографический материал представлен в огромном количестве (более 85 карт и картосхем). В целом, карты и картосхемы представлены на уровне четырех видов масштабов: карты Беларуси (рисунок 2), карты Брестской области (рисунок 4), карты Ивановского района (рисунок 4), карта Споровского заказника (рисунок 5). На картах Беларуси и Брестской области жирными контурами отмечена граница Ивановского района (рисунок 2). Данные карты использовались чаще всего для того, чтобы показать положение Ивановского района в общей системе анализируемого явления Беларуси либо области. Например, физико-географическое районирование Беларуси и положение Ивановского района в пределах его таксонов, либо



оценка распространения площадных ООПТ в пределах Брестской области и положение Ивановского района по сравнению с другими административными районами области.

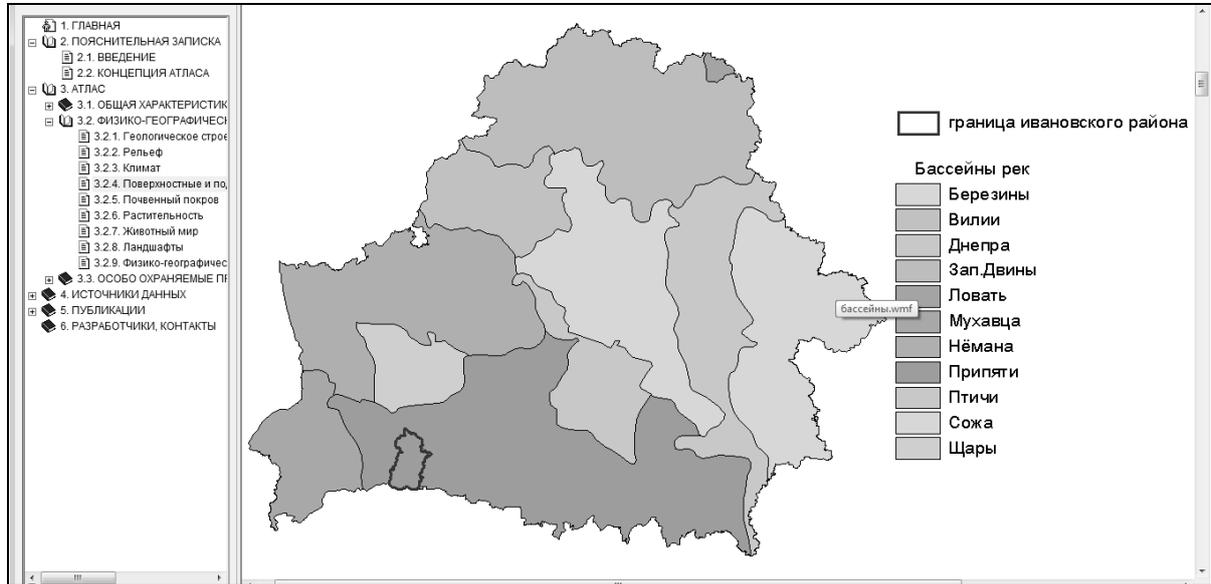


Рисунок 2 – Картосхема «Положение Ивановского района в пределах бассейна реки Припять» в Атласе

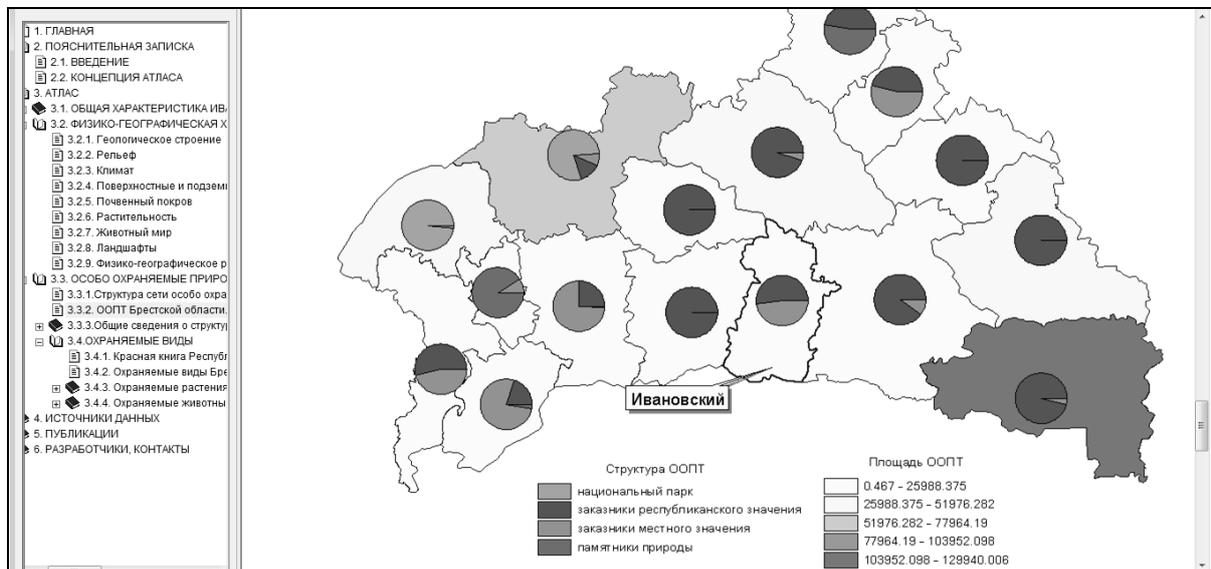


Рисунок 3 – Картосхема «Структура и классификация районов Брестской области по площади особо охраняемых природных территорий» в Атласе

Иллюстративный материал представлен диаграммами, графиками, фотографиями, художественными рисунками и схемами. В целом, в Атласе представлено 169 рисунков, из них 88 карт и картосхем (84 выполнено самостоятельно), 37 фотографий, 27 художественных рисунков, 12 круговых диаграмм и 4 столбчатых и 1 схема (все диаграммы и схемы выполнены самостоятельно).



Диаграммы и графики используются в Атласе для лучшей иллюстрации анализируемых объектов и явлений (рисунок 6). Они строились двумя основными путями:

– на основе статистических данных («Распределение городского и сельского населения в Ивановском районе (в %)), «Растительность на территории биологического заказника местного значения «Оброво»»);

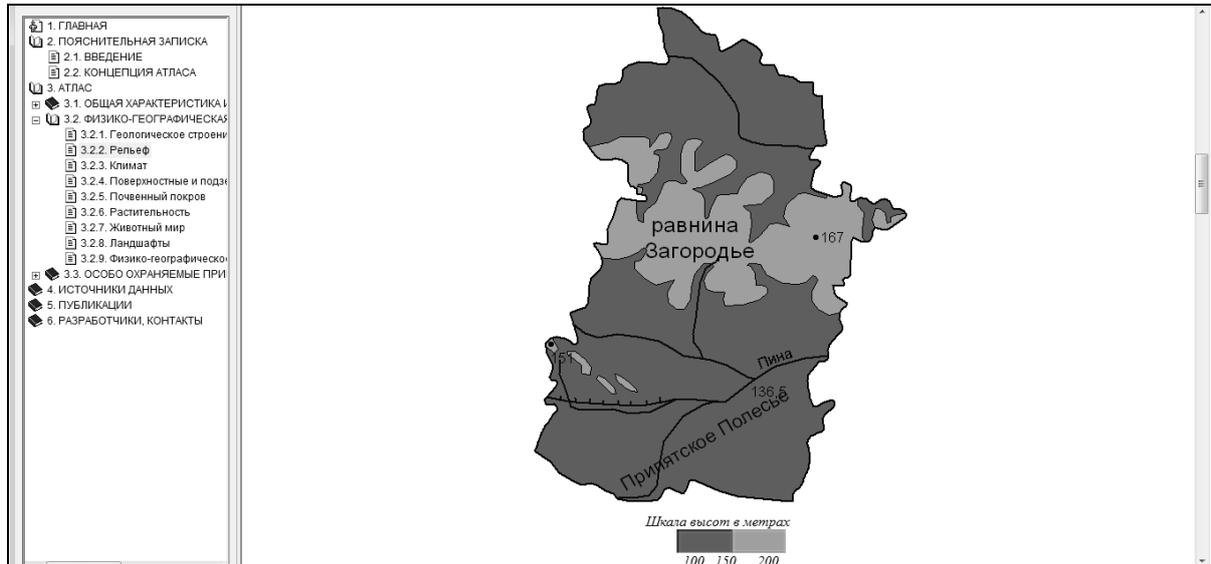


Рисунок 4 – Физическая карта Ивановского района в Атласе

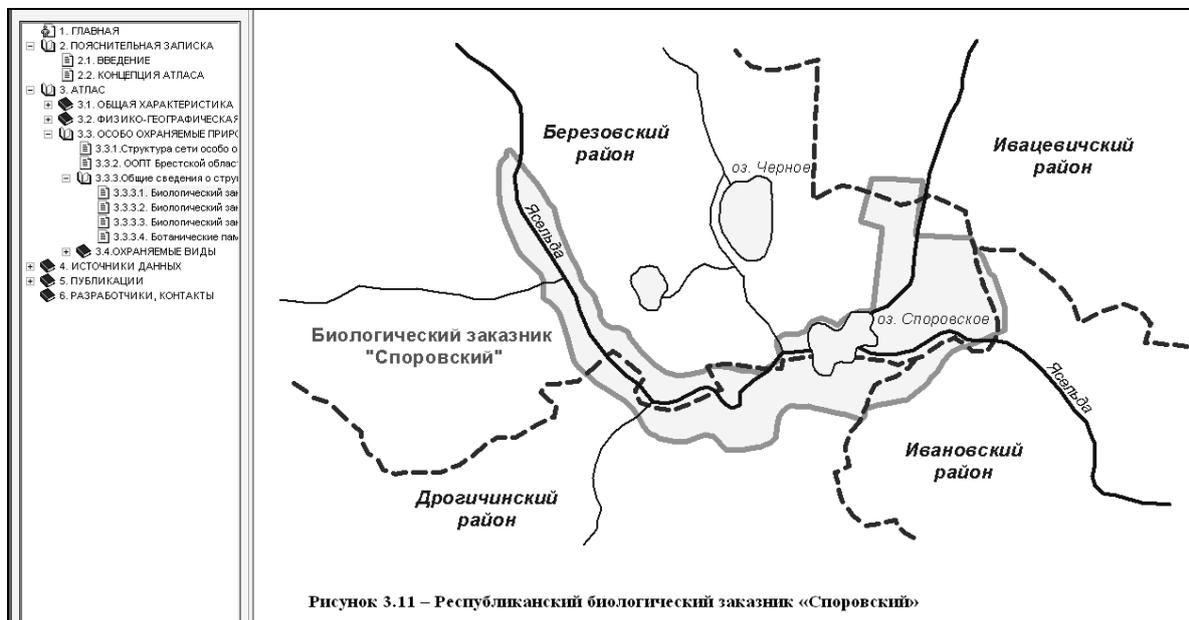


Рисунок 5 – Карта республиканского биологического заказника «Споровский» в Атласе

– на основе оцифрованных карт района (структура растительного покрова Ивановского района, виды лесов Ивановского района): с использованием ГИС-технологий рассчитывались площадные либо линейные значения, отображаемых на карте явлений, с использованием которых строились карты и картосхемы (например, столбчатые диаграммы, отображающие длины основных рек и длины основных каналов в пределах Ивановского района).



Фотографии и художественные рисунки представлены в разделах «Общие географические особенности Ивановского района» и «Охраняемые виды» (рисунок 7).

Табличный материал представлен в Атласе незначительно (11 таблиц). Чаще всего он отображает статистические сведения и дополняет картографический либо текстовый материал Атласа. Например, таблицы минерализация и химический состав подземных вод, климатообразующие факторы Ивановского района (рисунок 8) и др.



Рисунок 2.19 – Длина главных каналов в пределах территории Ивановского района

Рисунок 6 – Столбчатая диаграмма «Длина главных каналов в пределах территории Ивановского района» в Атласе

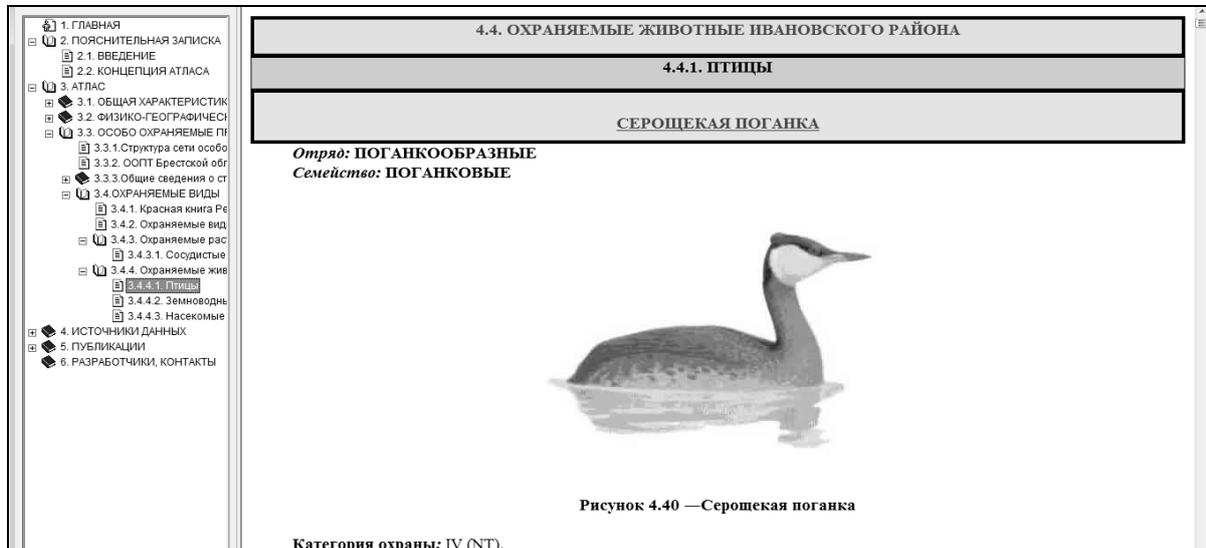


Рисунок 7 – Художественный рисунок «Серошекая поганка» в Атласе

Климатообразующие факторы

Таблица 2.1. – Климатообразующие факторы Ивановского района

Климатообразующие факторы	Значение	Единица измерения
Головая суммарная солнечная радиация	3950	МДж/м ²
Головой радиационный баланс земной поверхности	1800	МДж/м ²
Атмосферное давление:		гПа
январь	1018 – 1019	
июль	1013,0 – 1013,5	
Преобладающие ветры	Западные (26)	%

Рисунок 8 – Таблица «Климатообразующие факторы Ивановского района» в Атласе



Вспомогательная часть Атласа. Вспомогательная часть Атласа включает следующие части: главная страница, пояснительная записка, источники данных, публикации, разработчики и контакты.

Главная страница. На ней указаны название Атласа, разработчики, место и дата разработки (Брест, 2013 год).

Пояснительная записка состоит из двух основных частей: введение и концепция Атласа. Введение включает описание актуальности темы исследования, постановку цели и задач, которые решались в процессе создания Атласа, перечень проделанной работы для создания Атласа, список конференций, на которых докладывались данные при подготовке Атласа. Концепция Атласа определяет цели и задачи создания Атласа; принципы разработки и создания Атласа; функции Атласа; выбор и обоснование используемых программных средств для создания Атласа; структуру Атласа; перспективы создания и использования Атласа.

Источники данных. Так как для создания Атласа использовалось большое количество разных источников, то все они были объединены в 4 группы (картографические, литературные, фондовые и интернет-источники).

Картографические источники данных включают атласы, настенные и электронные карты.

Литературные источники включают разнообразную литературу, из которой использовались как картографический материал, так и справочно-статистические сведения («Блакітная кніга Беларусі», энциклопедические сборники «Регионы Беларуси», «Природа Беларуси», учебное пособие «Ландшафтоведение» и т.д.).

Фондовые источники данных представляют собой непечатные сведения, предоставленные преимущественно различными организациями: Ивановская районная инспекция природных ресурсов и охраны окружающей среды (в первую очередь), Брестский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды (по ООПТ Брестской области), отчет по НИР «Разработка и создание электронного геоэкологического атласа Брестской области» и др.

Интернет-источники – это ссылки на самые разнообразные интернет-источники, которые являлись вспомогательными средствами при создании Атласа. Например, сайт республиканского заказчика «Споровский», Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь, сайт электронной библиотеки БГУ и др.

Публикации. Данный раздел включает список всех публикаций авторов, опубликованных и подготовленных к печати, выполненных в результате подготовки и создании Атласа, а также полные тексты данных публикаций.

Разработчики, контакты. В данном разделе представлены сведения о разработчиках Атласа с их фотографиями и контактными данными (телефон, адрес, e-mail).

Основная часть Атласа. Основная часть Атласа включает четыре подраздела (рисунок 1).

Первый подраздел «Административно-территориальное устройство Беларуси. Современное положение Ивановского района в административно-территориальном устройстве Беларуси» включает краткое описание административно-территориального устройства Беларуси и областей. Отмечаются значительные отличия площадей административных районов Беларуси. Приводится картосхема Брестской области с площадными характеристиками Жабинковского района (самого маленького в Беларуси), Столинского района (самого большого) и Ивановского района. Проводится ранжирование районов Беларуси по площади, согласно которому Ивановский район относится к наименьшим районам. Описывается также современное положение Ивановского района в



пределах Беларуси, его границы. Приводится картосхема положения Ивановского района на политической карте и указываются районы, граничащие с ним, а также картосхемы населенных пунктов и центров сельсоветов Ивановского района.

Второй подраздел «История формирования территории Ивановского района» описывает историю формирования Ивановского района, включает карты Брестской области разных времен (конец XVI в., 1921–1939 гг. и др.).

Третий подраздел «Общие географические особенности Ивановского района» описывает население, хозяйство, транспорт, здравоохранение, образование и культуру Ивановского района. Приводятся круговые диаграммы по распределению городского и сельского населения, по национальному составу жителей района, а также картосхемы землепользователей, лесничеств и транспортной сети Ивановского района. В разделе, описывающем культуру района, представлены фотографии культурных объектов с белорусских интернет-сайтов, а также картосхема пунктов Дуги Струве в районе.

Раздел «Физико-географическая характеристика Ивановского района» создавался на основе картографических и литературных сведений. Данный раздел Атласа является очень объемным и сложно структурированным. Он состоит из девяти основных подразделов, составление которых во многом отличается друг от друга. Раздел включает карты Ивановского района, сделанные из Национального атласа Республики Беларусь и настенных карт Беларуси с их словесным анализом. В некоторых подразделах на основе ГИС-анализа данных электронных карт строились диаграммы и графики. Например, длина главных каналов в пределах территории Ивановского района (рисунок 6).

Необходимо отметить, что все карты районирования, приводимые в Атласе, созданы с учетом всей территории Беларуси. В них показано положение Ивановского района в пределах всей системы районирования Беларуси.

В некоторых разделах Атласа приводятся цифровые и другие сведения из литературных источников. Например, таблица «Климатообразующие факторы Ивановского района» (рисунок 8).

Коренным образом от восьми подразделов физико-географической части Атласа отличается подраздел «3.2.8 Ландшафты Ивановского района». В данном подразделе представлено положение Ивановского района в ландшафтном районировании Беларуси (согласно всем предыдущим районированиям), а также дана характеристика ландшафтов Ивановского района по основным классификационным ландшафтными единицам (группы родов, роды, подроды и виды ландшафтов). Данные карты были созданы на основании настенной ландшафтной карты Белорусской ССР, М 1 : 600 000. Кроме того, учитывая специфические особенности создания данных карт, в Атласе приводится описание современной классификации ландшафтов Беларуси и принципы выделения основных классификационных единиц.

Третий раздел «Особо охраняемые природные территории» состоит из трех частей, а последняя часть – из четырех подразделов.

Первая часть «Структура сети особо охраняемых природных территорий Беларуси» является справочно-ознакомительной, она создана на основе закона Республики Беларусь «Об особо охраняемых природных территориях». Цель данной части – ознакомить со всеми видами, типами и категориями особо охраняемых природных территорий (ООПТ), существующими в Беларуси.

Вторая часть «ООПТ Брестской области. Положение Ивановского района в общей системе ООПТ Брестской области» включает карту «ООПТ Брестской области», таблицы и диаграммы по распределению количества ООПТ и их площадей. Указано также положение Ивановского района в общей системе ООПТ Брестской области (ри-



сунок 3). Общая площадь ООПТ Ивановского района составляет 2,3% от территории района. Меньшие значения наблюдаются только в Жабинковском районе (0,65%).

Третья часть «Общие сведения о структуре ООПТ Ивановского района» включает таблицы и диаграммы о распределении площадей ООПТ Ивановского района и описание каждой ООПТ в пределах района. При описании заказников представляется карта с их местонахождением, описаны площадь и границы, общие физико-географические особенности, флора и фауна. Памятники природы описаны в следующем порядке: карта, местонахождение, граница и правила поведения на территории памятника природы.

Четвертый раздел Атласа «*Охраняемые виды*» создан на основе Красной книги Республики Беларусь 2005 года издания. В этом разделе представлено четыре части.

Ознакомительная часть «Красная книга Республики Беларусь»: сведения об истории создания Красной книги Беларуси, основные характеристики последнего издания Красной книги.

Часть «Охраняемые виды Брестской области»: приводятся сведения об охраняемых видах всей Брестской области и рассматривается положение Ивановского района по отношению к другим районам по количеству охраняемых видов животных и растений.

Часть «Охраняемые растения Ивановского района» включает описание охраняемых растений Ивановского района. Описание каждого вида включает: полное название, отдел, класс, порядок, семейство и категорию охраны растения, фотографию, краткое описание, местообитание и карту места произрастания, биологию, основные факторы угрозы и меры охраны.

Часть «Охраняемые животные Ивановского района» создана по аналогии с предыдущим разделом и описывает охраняемых животных Ивановского района. Там представлены: полное название, отряд, семейство и категория охраны животного, фотография, краткое описание, места обитания вместе с картой (карты отсутствуют при описании тех животных, которые распространены по всему Ивановскому району), биология, основные факторы угрозы и меры охраны.

Выводы. Разработка и создание электронного природоохранного атласа Ивановского района является одной из первых попыток комплексного атласного картографирования территории административного района Брестской области. Разработанная методика создания Атласа может служить основой для проведения аналогичного исследования других районов Республики Беларусь.

Атлас используется Ивановской районной инспекцией природных ресурсов и охраны окружающей среды, а также учителями географии Ивановского района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новик, С.М. Концепция электронного геоэкологического атласа Брестской области / С.М. Новик, В.А. Мороз, И.В. Ковалев // Брестский географический вестник. – 2005. – Вып. 1, Т. 5 – С. 47–55.
2. Электронное атласное картографирование для обеспечения устойчивого развития регионов Сибири / В.А. Снытко [и др.] // География и природ. ресурсы, 2003. – № 3. – С. 16–26.
3. Shkaruba, A.D. GIS-Based Expert Tool for Environmental Management in Belarusian Municipalities / A.D. Shkaruba, V.V. Kireyeu // Environmental Research, Engineering and Management (Lithuania). – 2004. – № 1 (27). – P. 46–51.



S.M. Tokarchuk, S.S. Romanjuk Electronic Nature Protection Atlas of Ivanovo District

The article describes the experience of creation of the electronic nature protection Atlas of Ivanovo district. The paper views the structure and general characteristic of the thematic contents of the Atlas. Examples of the text, cartographical, illustrative and tabular contents of the Atlas are given. The article content the main data on the maintenance of auxiliary and main parts of the Atlas.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 22.05.2013



ЗВЕСТКІ АБ АЎТАРАХ

- Абрамава І.В.** – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, дэкан геаграфічнага факультэта Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Андрусевіч П.П.** – выкладчык кафедры тэарэтычнай фізікі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Блоцкая А.С.** – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры анатоміі, фізіялогіі і бяспекі чалавека Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Бойка У.І.** – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, дэкан біялагічнага факультэта Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Гайдук В.Е.** – доктар біялагічных навук, прафесар кафедры заалогіі і генэтыкі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Галавач М.В.** – кандыдат біялагічных навук, дацэнт кафедры анатоміі, фізіялогіі і бяспекі чалавека Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Жыгар М.П.** – кандыдат біялагічных навук, прафесар кафедры батанікі і экалогіі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Каржаневіч С.В.** – кандыдат геаграфічных навук, выкладчык геаграфіі Пінскага каледжа Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Мартысюк І.А.** – кандыдат педагагічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры заалогіі і генэтыкі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Матусевіч Н.М.** – кандыдат біялагічных навук, дацэнт кафедры батанікі і экалогіі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Матысік А.В.** – кандыдат фізіка-матэматычных навук, дацэнт, загадчык кафедры прыкладной матэматыкі і тэхналогій праграмавання Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Плецохоў У.А.** – доктар фізіка-матэматычных навук, прафесар кафедры тэарэтычнай фізікі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Раманюк С.С.** – метадыст прыродазнаўства Аддзела адукацыі Іванаўскага райвыканкама
- Саўчук В.Ф.** – кандыдат фізіка-матэматычных навук, дацэнт кафедры прыкладной матэматыкі і тэхналогій праграмавання Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Ступень Н.С.** – кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры хіміі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Такарчук С.М.** – кандыдат геаграфічных навук, дацэнт кафедры фізічнай геаграфіі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Тарасюк А.М.** – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, загадчык кафедры заалогіі і генэтыкі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Тарыхазер Стара Абульфаз гызы** – кандыдат геаграфічных навук, дацэнт, вядучы навуковы супрацоўнік Інстытута геаграфіі імя акад. Г.А. Аліева Нацыянальнай Акадэміі Навук Азербайджана (г. Баку)
- Ткач С.М.** – старшы выкладчык кафедры інфарматыкі і камп'ютарных сістэм, намеснік дэкана фізіка-матэматычнага факультэта па вучэбнай працы Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна
- Трафімук А.А.** – кандыдат фізіка-матэматычных навук, загадчык кафедры алгебры і геаметрыі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна



ЗВЕСТКІ АБ АЎТАРАХ

Абрамава І.В. – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, дэкан геаграфічнага факультэта Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Андрусевіч П.П. – выкладчык кафедры тэарэтычнай фізікі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Блоцкая А.С. – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры анатоміі, фізіялогіі і бяспекі чалавека Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Бойка У.І. – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, дэкан біялагічнага факультэта Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Гайдук В.Е. – доктар біялагічных навук, прафесар кафедры заалогіі і генетыкі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Галавач М.В. – кандыдат біялагічных навук, дацэнт кафедры анатоміі, фізіялогіі і бяспекі чалавека Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Жыгар М.П. – кандыдат біялагічных навук, прафесар кафедры батанікі і экалогіі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Каржаневіч С.В. – кандыдат геаграфічных навук, выкладчык географіі Пінскага каледжа Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Мартысюк І.А. – кандыдат педагагічных навук, дацэнт, дацэнт кафедры заалогіі і генетыкі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Матусевіч Н.М. – кандыдат біялагічных навук, дацэнт кафедры батанікі і экалогіі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Матысік А.В. – кандыдат фізіка-матэматычных навук, дацэнт, загадчык кафедры прыкладной матэматыкі і тэхналогій праграмавання Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Плецохоў У.А. – доктар фізіка-матэматычных навук, прафесар кафедры тэарэтычнай фізікі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Раманюк С.С. – метадыст прыродазнаўства Аддзела адукацыі Іванаўскага райвыканкама

Саўчук В.Ф. – кандыдат фізіка-матэматычных навук, дацэнт кафедры прыкладной матэматыкі і тэхналогій праграмавання Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Ступень Н.С. – кандыдат тэхнічных навук, дацэнт, загадчык кафедры хіміі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Такарчук С.М. – кандыдат геаграфічных навук, дацэнт кафедры фізічнай географіі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Тарасюк А.М. – кандыдат біялагічных навук, дацэнт, загадчык кафедры заалогіі і генетыкі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Тарыхазер Стара Абульфаз гызы – кандыдат геаграфічных навук, дацэнт, вядучы навуковы супрацоўнік Інстытута географіі імя акад. Г.А. Аліева Нацыянальнай акадэміі навук Азербайджана (г. Баку)

Ткач С.М. – старшы выкладчык кафедры інфарматыкі і камп'ютарных сістэм, намеснік дэкана па вучэбнай працы фізіка-матэматычнага факультэта Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Трафімук А.А. – кандыдат фізіка-матэматычных навук, загадчык кафедры алгебры і геаметрыі Брэсцкага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.С. Пушкіна

Да ведама аўтараў

Рэдкалегія часопіса 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 экзэмплярах аб'ёмам ад 0,35 да 0,5 друкаванага аркуша, у электронным варыянце – у фармаце Microsoft Word for Windows (*.doc; *.rtf) і павінны быць аформлены 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.;
- міжрадкавы 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 аформлены паводле Інструкцыі па афармленні дысертацыі, аўтарэферата і публікацыі па тэме дысертацыі, зацверджанай пастановай Прэзідыума Дзяржаўнага вышэйшага атэстацыйнага камітэта Рэспублікі Беларусь ад 24.12.1997 № 178 (у рэдакцыі пастановы Вышэйшай атэстацыйнай камісіі Рэспублікі Беларусь ад 22.02.2006 № 2, ад 15.08.2007 № 4). Спасылкі на крыніцы ў артыкуле нумаруюцца адпаведна парадку цытавання. Парадкавыя нумары спасыллак падаюцца ў квадратных дужках (напрыклад, [1, с. 32], [2, с. 52–54]). Не дапускаецца выкарыстанне канцавых зносаў.

Матэрыял уключае наступныя элементы па парадку:

- індэкс УДК (выраўноўванне па левым краі);
- ініцыялы і прозвішча аўтара (аўтараў) (выдзяляюцца паўтлустым шрыфтам і курсівам; выраўноўванне па левым краі);
- назва артыкула (друкуецца вялікімі літарамі без пераносаў; выраўноўванне па левым краі);
- анатацыя ў аб'ёме ад 100 да 150 слоў на мове артыкула (кегль – 10 pt.);
- звесткі аб навуковым кіраўніку (для аспірантаў і саіскальнаў) указваюцца на першай старонцы артыкула ўнізе;
- асноўны тэкст, структураваны ў адпаведнасці з патрабаваннямі ВАК 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 літаратуры;
- рэзюмэ на англійскай мове (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 поўнасю, 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, аформленыя не ў адпаведнасці з выкладзенымі правіламі, рэдкалегіяй не разглядаюцца. Аўтары нясуць адказнасць за змест прадстаўленага матэрыялу.

Карэктары *А.В. Дзябёлая, Л.М. Калілец*
Камп'ютарнае макетаванне *С.М. Мініч, Г.Ю. Пархац*

Падпісана ў друк 24.01.2014. Фармат 60×84/8. Папера афсетная.
Гарнітура Таймс. Рызаграфія. Ум. друк. арк. 17,67. Ул.-выд. арк. 13,39.

Тыраж 100 экз. Заказ № 41.

Выдавец і паліграфічнае выкананне: УА «Брэсцкі дзяржаўны ўніверсітэт імя А.С. Пушкіна».

Пасведчанне аб рэгістрацыі № 1/55 ад 14.10.2013.

ЛП № 02330/454 ад 30.12.2013

224016, г. Брэст, вул. Міцкевіча, 28.