

Зараженность зерна озимой мягкой пшеницы и тритикале грибами рода *Fusarium* на территории РСО-Алания

И. Р. Манукян[✉]

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Владикавказского научного центра Российской академии наук, с. Михайловское, Республика Северная Осетия – Алания, Россия

[✉]E-mail: miririna.61@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследований видового состава фузариозных грибов, встречающихся в пораженном колосе и зерне озимой мягкой пшеницы и озимой тритикале. Молекулярно-генетическими методами обнаружены новые для региона виды фузариев, определены доминирующие виды. На восприимчивом сорте обнаружено больше видов микромицетов. **Методы.** Все более важную роль в изучении разнообразия представителей рода *Fusarium* приобретает метод филогенетического анализа. Подтверждение видовой принадлежности проводили методом ПЦР с универсальными праймерами и дальнейшим секвенированием нуклеотидных последовательностей по методу Сэнгера. Для секвенирования была амплифицирована область генов β-тубулина. **Результаты.** Выявлено 14 видов грибов рода *Fusarium*. Во всех образцах доминировал вид *F. graminearum*. С высокой частотой отмечены виды *F. avenaceum*, *F. sporotrichioides* и *F. equiseti*. Далее в порядке убывания частот встречаемости: *F. oxysporum*, *F. boothii*, *F. poae*, *F. proliferatum*, *F. incarnatum*, *F. vorosii*, *F. tricinctum*, *F. cerealis*, *F. sambucinum*. **Научная новизна.** Впервые для РСО-Алания в больном зерне пшеницы обнаружены шесть видов фузариозных грибов: *F. boothii*, *F. vorosii*, *F. cerealis*, *F. sporotrichioides*, *F. oxysporum*, *F. incarnatum*. Полученные результаты свидетельствуют о сообществе фузариозных грибов, постоянно присутствующих в зерновом агроценозе. В больном зерне тритикале обнаружено четыре вида фузариумов: *F. graminearum*, *F. oxysporum*, *F. equiseti* и *F. boothii*. Виды различаются между собой по требованиям к влаге и температуре, а также набором токсических веществ вторичного метаболизма, обеспечивающих конкурентные взаимодействия между видами и успешную колонизацию питательного субстрата. Постоянное присутствие в агроценозе комплекса фузариозных грибов, занимающих различные экологические ниши, обеспечивает непрерывное заражение колоса и зерна с фазы цветения до уборки.

Ключевые слова: пшеница озимая мягкая, заболевание колоса, грибы рода *Fusarium*, ДНК-маркер, филогенетический анализ

Для цитирования: Манукян И. Р. Зараженность зерна озимой мягкой пшеницы и тритикале грибами рода *Fusarium* на территории РСО-Алания // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 11. С. 1406–1415. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-11-1406-1415>.

Дата поступления статьи: 10.01.2024, **дата рецензирования:** 15.08.2024, **дата принятия:** 06.09.2024.

Contamination of winter soft wheat grain with and triticale grains *Fusarium* fungi in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania

I. R. Manukyan ✉

North Caucasus Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture –
a branch of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Mikhaylovskoe village, Republic of North Ossetia-Alania, Russia

✉E-mail: miririna.61@mail.ru

Abstract. This article presents the results of studies of the species composition of fusarium fungi found in the affected ear and grain of winter soft wheat and winter triticale. Molecular genetic methods have revealed new fusarium species for the region, and the dominant species have been identified. More types of micromycetes were found on the susceptible variety. **Methods.** Confirmation of the species was carried out by PCR with universal primers and further sequencing of nucleotide sequences using the Sanger method. The β -tubulin gene region was amplified for sequencing. **Results.** 14 species of fungi of the genus *Fusarium* have been identified. The species *F. graminearum* dominated in all samples (frequency of occurrence 42.8 %). The species *F. avenaceum* (23.3 %), *F. sporotrichioides* and *F. equiseti* (8.8 % each) were noted with high frequency. Next, in descending order of occurrence: *F. oxysporum*, *F. boothii*, *F. poae*, *F. proliferatum*, *F. incarnatum*, *F. vorosii*, *F. tricinctum*, *F. cerealis*, *F. sambucinum*. **Scientific novelty.** For the first time, six species of fusarium fungi were found in diseased wheat grain: *F. boothii*, *F. vorosii*, *F. cerealis*, *F. sporotrichioides*, *F. oxysporum*, *F. incarnatum*. The results obtained indicate a community of fusarium fungi that are constantly present in the grain agrocenosis. Four species of fusarium have been found in the diseased triticale grain: *F. graminearum*, *F. oxysporum*, *F. equiseti* and *F. boothii*. Species differ from each other in terms of moisture and temperature requirements, as well as a set of toxic substances of secondary metabolism that ensure competitive interactions between species and successful colonization of the nutrient substrate. The constant presence of a complex of fusarium fungi in the agrocenosis, occupying various ecological niches, ensures continuous infection of the ear and grain, starting from the flowering phase to harvesting.

Keywords: winter soft wheat, FHB (*Fusarium* head blight), fungi of the genus *Fusarium*, DNA marker, phylogenetic analysis

For citation: Manukyan I. R. Contamination of winter soft wheat grain and triticale grains with *Fusarium* fungi in the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (11): 1406–1415. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-11-1406-1415>. (In Russ.)

Date of paper submission: 10.01.2024, **date of review:** 15.08.2024, **date of acceptance:** 06.09.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Виды грибов рода *Fusarium* могут вызывать различные заболевания практически всех сельскохозяйственных культур, в том числе зерновых. При благоприятных погодных условиях инфицирование вегетативных и генеративных частей растения происходит на любых стадиях роста. Патогены вызывают увядания, развиваясь в проводящей системе растения, корневые гнили, повреждения колоса и зерна, различные пятнистости. Поражение генеративных органов пшеницы называется фузариозом колоса (ФК). ФК – распространенное заболевание зерновых культур во всем мире. Фузариозные грибы входят в пятерку самых разрушительных грибных патогенов, поражающих агроэкосистемы. Представители данного рода находятся в центре внимания исследователей во всем мире из-за токсигенных свойств. В глобальном масштабе ФК счита-

ется наиболее опасным и вредоносным заболеванием пшеницы, которое приводит к большим экономическим потерям, особенно в регионах с влажным климатом [1–4].

Заболевание влечет значительные потери урожая, а также загрязнение растительной продукции микотоксинами. К факторам, способствующим развитию заболевания, относятся недостаток устойчивых сортов, предшественники, обработка почвы, нарушение технологии возделывания, короткороционные севообороты, насыщенные зерновыми культурами свыше 50 %, в том числе кукурузой. За последние десять лет частота эпидемий фузариозом колоса существенно возросла. Изменения климата, а также изменения в системах земледелия приводят к постепенному распространению ФК по регионам [5; 6; 8].

Фузариоз колоса имеет отличительные особенности. Если возбудителями разных видов ржавчины, мучнистой росы, септориоза и других болезней пшеницы являются отдельные виды микромицетов и их физиологические расы, то в случае фузариоза колоса заболевание вызывает комплекс различных видов фузариозных грибов. Кроме того, возбудители фузариоза колоса не имеют узкой специализации, Специализация к питательному субстрату характерна для микроорганизмов с биотрофным типом питания, фузариоз же относится к сапротрофным организмам, способным переходить при благоприятных условиях к факультативному паразитизму. Грибы сохраняются в почве, на семенах, на растительных остатках, дикорастущих растениях, для них характерны высокая метаболическая активность и пластичность.

Последствиями заражения посевов фузариозом являются низкое качество семенного материала, потери урожая до 30–40 %, потеря хлебопекарных качеств, загрязнение зерна и кормов микотоксинами [9].

Межвидовая и внутривидовая конкурентоспособность грибов очень высока благодаря синтезу разнообразных токсических веществ. Почва является основной экологической нишей фузариумов. Распространяются с пораженными частями растений, ветром, водой, насекомыми. Встречаются в различных местообитаниях и на различных видах растений.

Распространение фузариозных грибов, границы их ареалов определяются биологическими особенностями видов, температурным оптимумом, почвенными и климатическими условиями региона. Изменения условий среды способствуют изменению численности и конкурентоспособности почвенной микробиоты, смене доминант в растительных сообществах. Видовой состав грибов, паразитирующих на пшенице, и структура доминирования видов может изменяться в зависимости от региона, сорта, стадии онтогенеза и анализируемого вегетативного органа.

Изучение существующего видового разнообразия фузариозных грибов в конкретных почвенно-климатических условиях – довольно сложная задача. В природных сообществах на уровне популяций постоянно происходят микроэволюционные процессы, поэтому часто встречаются так называемые виды-двойники. Такие виды имеют схожие морфологические признаки, например окраску мицелия, размер и форму макро- и микроконидий. Однако генетические различия уже существуют.

Со временем различия накапливаются, и происходит закономерный переход количества в качество – эволюционные пути видов расходятся. Идентификация отличительных признаков новых видов грибов имеет большое значение для исследования

фитосанитарной обстановки агроценозов и происходящих в них изменений.

Для надежной идентификации видов грибов широко используют современные методы, основанные на изучении нуклеотидных последовательностей маркерных генов, и филогенетический анализ. Методы филогенетического анализа позволяют прояснить многие таксономические трудности. С помощью филогенетического анализа были установлены новые виды грибов: *F. sibiricum* и *F. ussuriatum*, сходные с *F. graminearum*.

Было установлено, что вид *F. equiseti* вместе с *F. incarnatum* формирует комплекс видов со схожими морфокультуральными признаками (FIESC) [1; 10–12].

Наиболее часто в филогенетических исследованиях анализируются гены TRI5 и TRI14 трихотецевого кластера, участки гена, отвечающего за удлинение трансляции на рибосомах (TEF1 α), гены рибосомальных субъединиц (RPD1, RPB2), нуклеотидные фрагменты гена β -тубулина (TUB2) и гистона H3 [13].

Молекулярно-генетический анализ расширил возможности оценки родства между видами-двойниками, схожими по морфологическим признакам. Например, вид *F. tricinctum* рассматривался в качестве близкородственного вида с *F. sporotrichioides* и *F. poae* [11]. В то же время при сравнении видов по профилю токсических метаболитов было обнаружено, что *F. tricinctum* отличается от *F. sporotrichioides* и *F. poae*, секретирующих микотоксины трихотецековой группы. Филогенетический анализ подтвердил близкое родство *F. tricinctum*, *F. avenaceum* и *F. acuminatum* [12].

До недавнего времени *F. graminearum* рассматривался как единый полиморфный вид. В дальнейшем мультилокусный молекулярный анализ выявил филогенетически различные линии, получившие ранги видов: *Fusarium boothii* и *Fusarium vorosii* [14; 15].

Методология и методы исследования (Methods)

Изучалось зерно озимой мягкой пшеницы среднеустойчивого сорта Dorota (Франция) и средневосприимчивого сорта Батько (Россия) внешне здоровое и с симптомами фузариоза. Выделение грибов рода *Fusarium* и видовую идентификацию проводили по культурально-морфологическим и молекулярно-генетическим признакам в лаборатории микологии ФГБУ ВНИИКР. Изоляты (180) выделяли в чистую культуру в стерильных условиях по общепринятой методике. Культивировали грибы в течение 14 суток на 2-процентном картофельно-глюкозном агаре при 25 °С. Для работы использовали микроскоп Olympus BX43F, для морфометрии – программное обеспечение Quick-photo MICRO 3.2. Для подтверждения видовой принадлежности проводили классическую ПЦР [16–18].

Для секвенирования таксономически информативных локусов и идентификации фузариозных грибов была амплифицирована область генов β -тубулина. В качестве референсных были использованы последовательности генов β -тубулина, полученные из баз данных GenBank (NCBI) и FUSARIUM-ID. Полученные нуклеотидные последовательности имели размер около 300 п. н. После выравнивания полученные матрицы использовали для последующего филогенетического анализа [7; 8].

Результаты (Results)

Климатическими особенностями предгорной зоны Центрального Кавказа являются нестабильное увлажнение по годам и неравномерное выпадение осадков в течение вегетационного периода. Максимум осадков (152–180 % от нормы) выпадает в период колошения и цветения (май – июнь), т. е. в самый уязвимый период для заражения фузариозом колоса. В связи с особенностями погодных условий эпифитотии фузариоза случаются практически ежегодно [8].

В 2005–2007 гг. в регионе проводились исследования состава грибов рода *Fusarium* на озимой пшенице. Было выявлено, что в условиях предгорной и лесостепной зонах Северной Осетии патоккомплекс больного зерна представлен *F. graminearum*, *F. poae*, *F. avenacium*, *F. tricinctum*, *F. culmorum*, *F. verticillioides*, *F. accuminatum*. Наибольшая частота встречаемости отмечена у видов *F. graminearum* и

F. poae. Повторный мониторинг видового разнообразия был проведен в 2023 году.

По результатам микологического анализа из больного зерна выделено 9 морфологических групп, потенциально соответствующих 9 видам фузариевых грибов. По результатам молекулярно-генетического анализа выявлено 14 видов грибов рода *Fusarium*. Количество видов увеличилось за счет *F. equiseti*, *F. sporotrichioides*, *F. oxysporum*, *F. boothii*, *F. proliferatum*, *F. incarnatum*, *F. vorosii*, *F. sambucinum* (таблица 1).

Во всех образцах доминировал *F. graminearum*. С высокой частотой отмечены также виды *F. avenaceum* (23,3 %), *F. sporotrichioides* и *F. equiseti* (по 8,8 %). Далее в порядке убывания частот встречаемости: *F. oxysporum*, *F. boothii*, *F. poae*, *F. proliferatum*, *F. accuminatum*, *F. incarnatum*, *F. vorosii*, *F. tricinctum*, *F. cerealis*, *F. sambucinum*. За последние годы значительно увеличилась встречаемость вида *F. equiseti*. Чаще всего этот вид выделяли из корней и стеблей пшеницы. В наших исследованиях *F. equiseti* был выделен из зерна. Было изучено не только больное зерно, но и внешне здоровое. Наибольшее количество видов фузариозных грибов обнаружено в зерне восприимчивого сорта Батко. В зерне этого же сорта, но без внешних симптомов фузариоза колоса обнаружено шесть видов фузариевых грибов. В «здоровом» зерне отсутствовали виды: *F. oxysporum*, *F. cerealis*, *F. incarnatum*, *F. sambucinum*.

Таблица 1
Видовой состав возбудителей фузариоза колоса озимой мягкой пшеницы и тритикале

Виды грибов рода <i>Fusarium</i>	Число изолятов / частота встречаемости, %
Озимая мягкая пшеница	
<i>F. graminearum</i> (Schwabe)	77/42,8
<i>F. avenacium</i> (Sacc.)	42/23,3
<i>F. equiseti</i> (Corda) Sacc.	16/8,8
<i>F. sporotrichioides</i> (Sherb.)	16/8,8
<i>F. oxysporum</i> (Schlecht.)	7/3,9
<i>F. boothii</i> (O'Donnell)	5/2,8
<i>F. poae</i> (Peck.)	3/1,7
<i>F. proliferatum</i> (Matsush.)	3/1,7
<i>F. accuminatum</i> (Ellis.)	3/1,7
<i>F. incarnatum</i> (Desm.) Sacc.	2/1,1
<i>F. vorosii</i> (B. Toth)	2/1,1
<i>F. tricinctum</i> (Corda) Sacc.	2/1,1
<i>F. cerealis</i> (Cooke) Sacc.	1/0,6
<i>F. sambucinum</i> (Fuckel)	1/0,6
Озимая тритикале	
<i>F. graminearum</i> (Schwabe)	36/72,0
<i>F. oxysporum</i> (Schlecht.)	7/14,0
<i>F. equiseti</i> (Corda) Sacc.	4/8,0
<i>F. boothii</i> (O'Donnell)	3/6,0

Table 1
Species composition of *Fusarium* head blight pathogens of winter soft wheat ear and triticale

Types of fungi of <i>Fusarium</i>	Number of isolates / frequency of occurrence, %
Winter soft wheat	
<i>F. graminearum</i> (Schwabe)	77/42.8
<i>F. avenacium</i> (Sacc.)	42/23.3
<i>F. equiseti</i> (Corda) Sacc.	16/8.8
<i>F. sporotrichioides</i> (Sherb.)	16/8.8
<i>F. oxysporum</i> (Schlecht.)	7/3.9
<i>F. boothii</i> (O'Donnell)	5/2.8
<i>F. poae</i> (Peck.)	3/1.7
<i>F. proliferatum</i> (Matsush.)	3/1.7
<i>F. accuminatum</i> (Ellis.)	3/1.7
<i>F. incarnatum</i> (Desm.) Sacc.	2/1.1
<i>F. vorosii</i> (B. Toth)	2/1.1
<i>F. tricinctum</i> (Corda) Sacc.	2/1.1
<i>F. cerealis</i> (Cooke) Sacc.	1/0.6
<i>F. sambucinum</i> (Fuckel)	1/0.6
Winter triticale	
<i>F. graminearum</i> (Schwabe)	36/72.0
<i>F. oxysporum</i> (Schlecht.)	7/14.0
<i>F. equiseti</i> (Corda) Sacc.	4/8.0
<i>F. boothii</i> (O'Donnell)	3/6.0

Таблица 2

Видовой состав грибов рода *Fusarium* на различных сортах озимой мягкой пшеницы

Сорт	Видовой состав	
	Внешне больные	Внешне здоровые
Батько	<i>F. graminearum</i> , <i>F. avenacium</i> , <i>F. oxysporum</i> , <i>F. cerealis</i> , <i>F. incarnatum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. poae</i> , <i>F. vorosii</i> , <i>F. sambucinum</i>	<i>F. graminearum</i> , <i>F. avenacium</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. accuminatum</i> , <i>F. boothii</i>
Dorota	<i>F. graminearum</i> , <i>F. avenacium</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. incarnatum</i>	<i>F. avenacium</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. tricinctum</i>

Table 2

Species composition of *Fusarium* fungi on various varieties of winter soft wheat

Variety	Species composition of fungi	
	Externally diseased	Externally healthy
Bat'ko	<i>F. graminearum</i> , <i>F. avenacium</i> , <i>F. oxysporum</i> , <i>F. cerealis</i> , <i>F. incarnatum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. poae</i> , <i>F. vorosii</i> , <i>F. sambucinum</i>	<i>F. graminearum</i> , <i>F. avenacium</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. accuminatum</i> , <i>F. boothii</i>
Dorota	<i>F. graminearum</i> , <i>F. avenacium</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. incarnatum</i>	<i>F. avenacium</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. sporotrichioides</i> , <i>F. tricinctum</i>

В пораженном фузариозом зерне более устойчивого сорта Dorota обнаружено шесть видов фузариевых грибов. В зерне без симптомов также присутствовали фитопатогены. Не обнаружен *F. graminearum*, но встречается *F. tricinctum*. Наиболее часто встречаемые виды: *F. graminearum*, *F. avenacium*, *F. sporotrichioides*, *F. equiseti*. Эти же виды присутствуют в больном и внешне здоровом зерне. Озимая тритикале более устойчива к фузариозной инфекции. В пораженном зерне преобладает самый агрессивный вид – *F. graminearum*. Сопутствующими видами являются *F. equiseti* и *F. oxysporum*. Установленная нами видовая спецификация фузариозных грибов, выделенных из зерна с симптомами фузариоза колоса и без них, подтверждает тот факт, что заражение колоса и зерна происходит непрерывно от фазы цветения до уборки. Скрытая инфекция в «здоровом» зерне при благоприятных условиях может развиваться и при хранении, т. к. фузариоз – это сапротрофные организмы.

В начальные периоды колос заражают более агрессивные виды, такие как *F. graminearum* и *F. avenacium*. Этим объясняется высокая частота их встречаемости (таблица 2).

Судя по видовому составу фузариозных грибов, в пораженном зерне могут накапливаться микотоксины разных типов: трихотеценовые типа А (*F. sporotrichioides*, *F. poae*), трихотеценовые токсины типа В (*F. graminearum*, *F. cerealis*, *F. sambucinum*), токсины энниатиновой группы и монилиформина (*F. avenaceum*, *F. tricinctum*, *F. acuminatum*) [19].

Полученные изоляты были исследованы методами молекулярной филогении. В результате ДНК-секвенирования определены нуклеотидные последовательности гена β-тубулина для всех изолятов.

Полученные нуклеотидные последовательности после их выравнивания использовались для последующего филогенетического анализа (рис. 1).

На филогенетическом дереве все изоляты распределились по кладам, которые объединяются в более крупные ветви или комплексы. Филогенетический анализ показал, что виды *F. graminearum*, *F. boothii*, *F. cerealis*, *F. vorosii*, имеющие схожие морфологические характеристики и принадлежащие к комплексу FGSC (*Fusarium graminearum* species complex), формировали общую ветвь. Высокие темпы роста мицелия отмечены у более агрессивного вида *F. graminearum*. Изоляты *F. sporotrichioides*, *F. poae*, относящиеся к комплексу FSAMSC (*Fusarium sambucinum* species complex), формировали отдельные независимые ветви [12–14].

Пять изолятов *Fusarium graminearum* F43, F59, F93, F36, F110 располагались в пределах больной клады, образованной референсным изолятом MW533966.1 *Fusarium graminearum* CBS 136009. Два изолята F70, F71 оказались близкородственными референсному изоляту MG063785.1 *Fusarium graminearum* vorosii. Изолят F92 *F. cerealis* образовывал кладу с двумя референсными штаммами KJ125832.1 и AF314487.

К видовому комплексу *Fusarium tricinctum* species complex (FTSC) относятся *F. avenaceum*, *F. tricinctum*, *F. accuminatum*. Изоляты формируют независимую большую ветвь. Имеют схожие морфологические признаки. Мицелий на питательной среде растет компактным и ворсистым от белого до светло-желтого цвета. Реверс колонии карминово-красный.

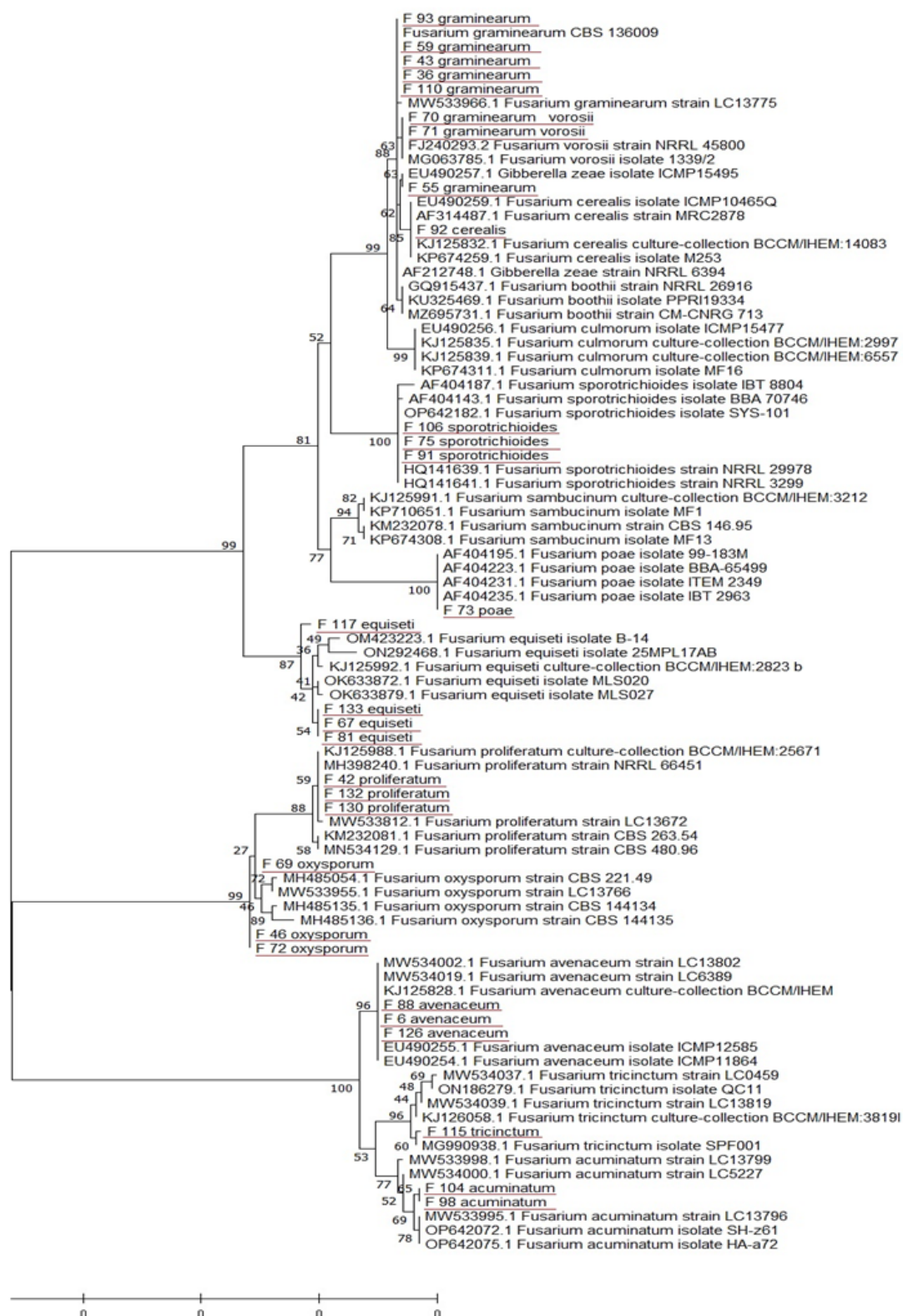


Рис. 1. Филогенетическое дерево изолятов грибов рода *Fusarium*, построенное на основании последовательностей участка гена β -тубулина

Fig. 1. Phylogenetic tree of *Fusarium* isolates based on sequences of the β -tubulin gene region

Считается, что *F. incarnatum* и *F. equiseti* принадлежат к видовому комплексу (FIESC) и демонстрируют схожую морфологию. Внешний вид колоний *F. incarnatum* и *F. equiseti* представлял собой обильный мицелий, который изначально белого цвета, но со временем становится желтовато-коричневым [15]. Хотя *F. incarnatum* и *F. equiseti* принадлежат к одному видовому комплексу и считаются умеренно агрессивными, они способны продуцировать разнообразные микотоксины, включая трихотецены. По токсигенным хемотипам *F. equiseti* относится хемотипу ZEN, а *F. incarnatum* – к хемотипу DON [16]. На филогенетическом дереве *F. equiseti* формирует отдельную кладу (рис. 1). Изоляты F81, F67, F133 и F117 вошли в кладу *Fusarium equiseti*, однако внутри нее формировали две отдельные подклады, не включающие в свой состав ни одного референсного штамма.

Изоляты F75, F91, F106 сформировали единую большую кладу, содержащую референсную последовательность HQ141639.1 *Fusarium sporotrichioides* NRRL 29978. На филограмме изолят F73 оказался близкородственным видам большой клады, основанной на последовательностях с максимальными значениями бутструп-поддержки с референсными типовыми штаммами AF 404235.1 *Fusarium poae* isolate IBT 2963.

Изоляты F130, F42, F132 вошли в большую кладу с высокими значениями бутструп-поддержки с референсными типовыми штаммами MW533812.1 *Fusarium proliferatum* strain LC13672 и MH398240 *Fusarium proliferatum* strain NRRL66451.

Изоляты F46, F72, F69 вошли в большую кладу *Fusarium oxysporum*, однако внутри нее формировали отдельные подклады, не включающие в свой состав ни одного референсного штамма.

Изоляты F6, F88, F126 вошли в кладу *Fusarium avenaceum* с высокими значениями бутструп-поддержки с референсными типовыми штаммами EU490225.1 *Fusarium avenaceum* isolate ICMP12585.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Виды микромицетов, относящиеся к роду *Fusarium*, представляют собой сложную в филогенетическом отношении группу, имеют большое прикладное значение не только в фитопатологии, но и в медицине и микотоксикологии. После появления и все более широкого применения генетических и молекулярных методов совместно с усовершенствованными морфологическими методами было открыто и описано множество новых видов в составе этого рода. В настоящее время к роду фузариевых грибов относятся десятки филогенетически самостоятельных видов, 20 клад, или комплексов видов, 9 монофилетических линий. Таксономия рода постоянно меняется [1; 6].

По морфологическим и молекулярным характеристикам идентифицировано 180 изолятов. Было

обнаружено 14 видов из рода *Fusarium*. Количество видов фузариевых грибов обнаружено на восприимчивом сорте. Высокая частота встречаемости отмечена у более агрессивных видов: *F. graminearum*, *F. avenaceum*, *F. sporotrichioides*, *F. equiseti*. Эти виды успешно выдерживают межвидовую конкуренцию. Установлена скрытая инфекция фузариевых грибов в зерне без видимых симптомов более устойчивого сорта. Учитывая тот факт, что фузариозные грибы являются сапротрофами, их развитие и жизнедеятельность продолжают и после уборки. При благоприятных для микромицетов условиях колонизация субстрата и накопление микотоксинов могут продолжаться и во время хранения. Использование современных методов в фитопатологическом анализе существенно расширило сведения о грибах рода *Fusarium*, показало их видовое разнообразие в патоккомплексе пораженного колоса и зерна.

Благодаря молекулярно-генетическим методам стало возможным определить, к каким видам принадлежат изоляты, определить их видовую принадлежность, охарактеризована степень родства. Некоторые из них обнаружены впервые на территории предгорной зоны Центрального Кавказа. К таковым относятся шесть видов: *F. boothii*, *F. vorosii*, *F. cerealis*, *F. sporotrichioides*, *F. oxysporum*, *F. incarnatum*. В большом зерне обнаружены не только фузариозные грибы. Сопутствующими фитопатогенами были микромицеты из нескольких родов, в том числе *Helminthosporium*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Epicoccum*.

Очевидно, что уникальность этого заболевания, т. е. участие комплекса различных видов в патогенезе, способность поражать растения на разных этапах онтогенеза, отсутствие узкой специализации микромицетов, затрудняют селекцию на устойчивость к ФК. Устойчивость к заболеванию является типичным количественным признаком, и процесс заражения является сложным. Морфологические и фенологические особенности растений и условия их выращивания – все это влияет на заражение и развитие заболевания. Считается, что более высокие растения и короткий период цветения способствуют устойчивости к ФК, а также осложняют защиту растений от заражения и развития фузариозных грибов.

Таким образом, род *Fusarium* насчитывает множество видов, которые морфологически трудно различимы. Филогенетический анализ показал высокую степень межвидового полиморфизма нуклеотидных последовательностей гена β -тубулина, специфических или характерных на уровне отдельных видов. ДНК-маркеры оказались эффективными молекулярными инструментами для дифференциации близкородственных видов *Fusarium*. Для более точного изучения видового разнообразия и определения доминирующих видов на территории реги-

она необходимо исследовать зерно урожая разных лет выращивания. Увеличение посевных площадей и урожайности зерновых делает исследования по видовому разнообразию фузариумов актуальнее с каждым годом. Впервые на территории РСО-Алания с применением методов молекулярной филогении определено биологическое разнообразие фитопатогенов фузариозного заболевания колоса и зерна. Скрининг видов грибов рода *Fusarium* в па-

токомплексе фузариоза колоса поможет оптимизировать борьбу с заболеванием, улучшить контроль качества продуктов питания, сырья и кормов, разработать более эффективную систему интегрированной защиты пшеницы от заболевания.

Распространение в почвах патогенных и токсигенных микромицетов свидетельствует также о низкой супрессивности почвы и антропогенных загрязнениях [19].

Библиографический список

1. Гаврилова О. П., Гагкаева Т. Ю., Орина А. С., Гогина Н. Н. Разнообразие видов фузариоза и их микотоксинов в зерновых культурах Азиатской территории России // Доклады биологических наук. 2023. № 508 (1). С. 9–19. DOI: 10.1134/S0012496622700156.
2. Бучнева Г. Н., Гусев И. В., Корабельская О. И., Дубровская Н. Н., Чекмарев В. В. Видовой состав и частота встречаемости грибов рода *Fusarium* на сортах пшеницы в Тамбовской области // Зерновое хозяйство России. 2019. № 2 (62). С. 74–76. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-62-2-74-76.
3. Костерина Н. А. Анализ современного состояния проблемы фузариоза колоса и зерна пшеницы в Российской Федерации // Аграрный вестник Урала. 2023. № 05 (234). С. 49–60. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-234-05-49-60.
4. Аблова И. Б., Тархов А. С. Поиск доноров и источников устойчивости пшеницы к фузариозу колоса и вовлечение их в селекционную программу // Генетика и селекция растений, основанная на современных генетических знаниях и технологиях: материалы Международной научной конференции молодых ученых. Звенигород, 2008. С. 5–6.
5. Манукян И. Р., Басиева М. А., Мирошникова Е. С., Абиев В. Б. Оценка экологической пластичности сортов озимой пшеницы в условиях предгорной зоны Центрального Кавказа // Аграрный вестник Урала. 2019. № 4 (183). С. 20–26. DOI: 10.32417/article_5cf94f63b4d0f7.46300158.
6. Левитин М. М., Джавахия В. Г. Токсигенные грибы и проблемы продовольственной безопасности (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34, № 12. С. 5–11. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11201.
7. Стахеев А. А., Самохвалова Л. В., Рязанцев Д. Ю., Завриев С. К. Молекулярно-генетические методы в исследовании таксономии и специфической идентификации токсинпродуцирующих грибов рода *Fusarium*: успехи и проблемы // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51 (3). С. 275–284. DOI: 10.15389/agrobiology.2016.3.275rus.
8. Стахеев А. А., Самохвалова Л. В., Микитюк О. Д., Завриев С. К. Филогенетический анализ и молекулярное типирование трихотеценпродуцирующих грибов рода *Fusarium* из российских коллекций // Acta naturae. 2018. Т. 10, № 2 (37). С. 85–99. DOI: 10.32607/20758251-2018-10-2-79-92.
9. Kebede M., Adugna G., Hundie B. Status of *Fusarium* head blight on wheat fields in Southwestern Ethiopia // Italian Journal of Mycology. 2021. Vol. 50, No. 1. Pp. 117–130. DOI: 10.6092/issn.2531-7342/13320.
10. Шварцев А. А., Королева М. Л., Блинова С. А., Рубец В. С., Пыльнев В. В. Анализ видового разнообразия возбудителей фузариозов на озимой тритикале (*Triticosecale* Wittm. ex A. Camus) с использованием молекулярно-генетических методов // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2023. Вып. 1. С. 65–75. DOI: 10.17072/1994-9952-2023-1-65-75.
11. Chandra N. R., Wulff E. G., Udayashankar A. C., Nandini B. P., Niranjana S. R., Mortensen C. N., Prakash N. S. Prospects of molecular markers in *Fusarium* species diversity // Applied Microbiology and Biotechnology. 2011. Vol. 90, No. 5. Pp. 1625–1639. DOI: 10.1007/s00253-011-3209-3.
12. Wegulo S. N., Valverde-Bogantes E., Dolanos-Carriel C., Hallen-Adams H., Bianchini A., McMaster N., Schmale D. G. First report of *Fusarium boothii* causing head blight of wheat in the United States // Plant Disease. 2018. Vol. 102, No. 12. Pp. 2646–2667. DOI: 10.1094/PDIS-04-18-0696-PDN.
13. Leyiva-Mir S. G., Garcia-Leon F. K., Camacho-Nahia M., Vllasenor H., Romero G. F., Towar-Pedaza J. M. Occurrence of the *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex causing fusarium head blight of wheat in Mexico // Plant Disease. 2022. Vol. 10. Pp. 2755. DOI: 10.1094/PDIS-11-21-2467-PDN.
14. Xi K., Shan L., Yang Y., Zhang G., J. Zhang., Guo Y. Species Diversity and Chemotypes of *Fusarium* Species Associated With Maize Stalk Rot in Yunnan Province of Southwest China // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. DOI: 10.3389/fmicb.2021.652062.
15. Avilla C. F., Moreira G. M., Nicollii C. P., Gomes L. B., Abreru L. M., Pfenning, L. H. *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex associated with Brazilian rice: phylogeny, morphology, and toxigenic po-

tential // International Journal of Food Microbiology. 2019. Vol. 306. Article number 108267. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108267.

16. Laraba I., McCormick S. P., Vaughan M., Geiser D. M., O'Donnell K. Phylogenetic diversity, trichothecene potential, and pathogenicity within *Fusarium sambucinum* species complex // PLoS One. 2021. Vol. 16, No. 4. Article number e0250812. DOI: 10.1371/journal.pone.0245037.

17. Wang W., Wang B., Sun X., Qi X., Gong, G. Symptoms and pathogens diversity of corn *Fusarium* sheath rot in Sichuan province, China // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. DOI: 10.1038/s41598-021-82463-2.

18. Хасанов Б. А., Шеримбетов А. Г. Таксономия рода *Fusarium* и современные методы идентификации его видов (обзор) // Узбекский биологический журнал. 2020. № 2. С. 22–32.

19. Домрачева Л. И., Скугорева С. Г., Ковина А. Л., Коротких А. И., Стариков П. А., Ашимхина Т. Ч. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 14–25. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-02.

Об авторе:

Ирина Рафиковна Манукян, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела селекционных технологий и первичного семеноводства сельскохозяйственных культур, Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Владикавказского научного центра Российской академии наук, с. Михайловское, Республика Северная Осетия – Алания, Россия; ORCID 0000-0002-1620-4302, AuthorID 377607. E-mail: miririna.61@mail.ru

References

1. Gavrilova O. P., Gagkaeva T. Yu., Orina A. S., Gogina N. N. Diversity of *Fusarium* Species and Their Mycotoxins in Cereal Crops from the Asian Territory of Russia. *Reports of Biological Sciences*. 2023; 508 (1): 9–19. DOI: 10.1134/S0012496622700156. (In Russ.)

2. Buchneva G. N., Gusev I. V., Korabel'skaya O. I., Dubrovskaya N. N., Chekmarev V. V. Varietal composition and frequency of *Fusarium* presence on winter wheat varieties in the Tambov region. *Grain Economy of Russia*. 2019; 2 (62): 74–76. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-62-2-74-76. (In Russ.)

3. Kosterina N. A. Analysis of the current state of the problem of fusarium ear and grain of wheat in the Russian Federation. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023; 05 (234): 49–59. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-234-05-49-60. (In Russ.)

4. Ablova I. B., Tarhov A. S. Search for donors and sources of wheat resistance to ear fusarium and their involvement in the breeding program. *Genetics and plant breeding based on modern genetic knowledge and technologies: proceedings of the international scientific conference of young scientists*. Zvenigorod, 2008. Pp. 5–6. (In Russ.)

5. Manukyan I. R., Basieva M. A., Miroshnikova E. S., Abiev V. B. Assessment of ecological plasticity of winter wheat varieties in the conditions of a foothill zone of the Central Caucasus. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019; 4 (183): 20–26. DOI: 10.32417/article_5cf94f63b4d0f7.46300158. (In Russ.)

6. Levitin M. M., Dzhavakhiya V. G. Toxigenic fungi and food security issues (review). *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2020; 34 (12): 5–11. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-11201. (In Russ.)

7. Stakheev A. A., Samokhvalova L. V., Ryazantsev D. Yu., Zavriev S. K. Molecular genetic approaches for investigation of taxonomy and specific identification of toxin-producing *Fusarium* species: achievements and problems (review). *Agricultural Biology*. 2016; 51 (3): 275–284. DOI: 10.15389/agrobiology.2016.3.275rus. (In Russ.)

8. Stakheev A. A., Samokhvalova L. V., Mikityuk O. D., Zavriev S. K. Phylogenetic analysis and molecular typing of trichothecene-producing *Fusarium* fungi from Russian collections. *Acta Naturae*. 2018; 10 (2): 79–92. DOI: 10.32607/20758251-2018-10-2-79-92. (In Russ.)

9. Kebede M., Adugna G., Yundie B. Status of *Fusarium* head blight on wheat fields in Southwestern Ethiopia. *Italian Journal of Mycology*. 2021; 50 (1): 117–130. DOI: 10.6092/issn.2531-7342/13320.

10. Shvartsev A. A., Koroleva M. L., Blinova S. A., Rubets V. S., Pylnev V. V. Molecular genetic analysis for *Fusarium* species diversity in the winter triticale (*×Triticosecale Wittm. Ex A. Camus*). *Bulletin of Perm University. Biolog.* 2023; 1: 65–75. DOI: 10.17072/1994-9952-2023-1-65-75. (In Russ.)

11. Chandra N. R., Wulff E. G., Udayashankar A. C., Nandini B. P., Niranjana S. R., Mortensen C. N., Prakash N. S. Prospects of molecular markers in *Fusarium* species diversity. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2011; 90 (5): 1625–1639. DOI: 10.1007/s00253-011-3209-3.

12. Wegulo S. N., Valverde-Bogantes E., Dolanos-Cariel C., Hallen-Adams H., Bianchini A., McMaster N., Schmale D. G. First report of *Fusarium boothii* causing head blight of wheat in the United States. *Plant Disease*. 2018; 102 (12): 2646–2667. DOI: 10.1094/PDIS-04-18-0696-PDN.

13. Leyiva-Mir S. G., Garcia-Leon F. K., Camacho-Nahia M., Vllasenor H., Romero G. F., Towar-Pedaza J. M. Occurrence of the *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex causing fusarium head blight of wheat in Mexico. *Plant Disease*. 2022; 10: 2755. DOI: 10.1094/PDIS-11-21-2467-PDN.
14. Xi K., Shan L., Yang Y., Zhang G., J. Zhang., Guo Y. Species Diversity and Chemotypes of *Fusarium* Species Associated With Maize Stalk Rot in Yunnan Province of Southwest China. *Frontiers in Microbiology*. 2021; 12. DOI: 10.3389/fmicb.2021.652062.
15. Avilla C. F., Moreira G. M., Nicollii C. P., Gomes L. B., Abneru L. M., Pfenning, L. H. *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex associated with Brazilian rice: phylogeny, morphology, and toxigenic potential. *International Journal of Food Microbiology*. 2019; 306: 108267. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108267.
16. Laraba I., McCormick S. P., Vaughan M., Geiser D. M., O'Donnell K. Phylogenetic diversity, trichothecene potential, and pathogenicity within *Fusarium sambucinum* species complex. *PLoS One*. 2021; 16 (4): e0250812. DOI: 10.1371/journal.pone.0245037.
17. Wang W., Wang B., Sun X., Qi X., Gong, G. Symptoms and pathogens diversity of corn *Fusarium* sheath rot in Sichuan province, China. *Scientific Reports*. 2021; 11. DOI: 10.1038/s41598-021-82463-2.
18. Khasanov B. A., Sherimbetov A. G. Taxonomy of the genus *Fusarium* and modern methods of identification its species (review). *Uzbek Biological Journal*. 2020; 2: 22–32. (In Russ.)
19. Domracheva L. I., Skugoreva S. G., Kovina A. L., Korotkikh A. I., Starikov P. A., Ashikhmina T. Ya. Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review) (review). *Theoretical and Applied Ecology*. 2022; 3: 14–25. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025. (In Russ.)

Author's information:

Irina R. Manukyan, candidate of biological sciences, leading researcher of the department of breeding technologies and primary seed production of agricultural plants, North Caucasus Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture – a branch of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Mikhaylovskoe village, Republic of North Ossetia-Alania, Russia; ORCID 0000-0002-1620-4302, AuthorID 377607. E-mail: miririna.61@mail.ru