

УДК 372.8:57

Для цитирования: Арипшева Б.М., Бекулова И.З. Использование законов термодинамики при изучении живых организмов в курсе школьной биологии // Научно-методический журнал «Поиск научных решений». 2023. № 1. С. 93–106.

**Использование законов термодинамики
при изучении живых организмов в курсе школьной биологии**

Арипшева Бэлла Мухамедовна

Государственное бюджетное учреждение
дополнительного профессионального образования «Центр непрерывного
повышения профессионального мастерства педагогических работников»
Министерства просвещения и науки Кабардино-Балкарской Республики

Бекулова Индира Зарифовна

Муниципальное казенное общеобразовательное учреждение
«Лицей № 2» г.о. Нальчик

Аннотация. В статье рассматривается метапредметный подход к обучению и вопросы формирования функциональной грамотности. Межпредметная связь физики с биологией в рамках термодинамики понимается как применение законов термодинамики к существованию и функционированию биологических систем и к объяснению процесса эволюционного развития органического мира. В работе указывается на необходимость углубления метапредметного подхода к образованию через освоение метапредметных навыков и, соответственно, создания и развития метапредметных образовательных технологий, в частности при подготовке обучающихся к итоговой аттестации по биологии. Авторы приводят примеры заданий из ЕГЭ по биологии, в которых акцент сделан на реализацию системно-деятельностного подхода к изучению законов термодинамики. Важным является совместное применение первого и второго начала термодинамики, которые позволяют дать объяснение механизмам генотипической и фенотипической адаптации живых организмов.

Ключевые слова: метапредметность, биологическая система, начала термодинамики, адаптивность, экологическая пирамида, тепловая машина.

The use of the laws of thermodynamics in studying living organisms in the school Biology course

Aripsheva Bella Mukhamedovna

State Budgetary Institution of Additional Professional Education
"Center for Continuous Development of Professional Mastery
of Teaching Staff" of the Ministry of Enlightenment and Science
of the Kabardino-Balkarian Republic

Bekulova Indira Zarifovna

Municipal State Educational Institution
"Lyceum no. 2", Nalchik

Abstract. The article discusses the meta-subject approach to learning and forming functional literacy. The interdisciplinary connection between Physics and Biology within thermodynamics is understood as the application of the laws of thermodynamics to the existence and functioning of biological systems and to the explanation of the process of evolutionary development of the organic world. The paper shows the need to extend the meta-subject approach to education through the development of meta-subject skills, the creation and development of meta-subject educational technologies, especially in preparing students for the Final Assessment in Biology. The authors give examples of tasks from the Unified State Examination in Biology, which emphasise the implementation of a systemic activity-based approach to studying of the laws of thermodynamics. The joint application of the first and second principles of thermodynamics is important as it makes it possible to explain the mechanisms of genotypic and phenotypic adaptation of living organisms.

Keywords: meta-subject, biological system, laws of thermodynamics, additivity, ecological pyramid, heat engine.

Одна из главных задач современного образования – развитие и воспитание мобильной нравственной личности, непрерывно осваивающей новые знания и компетенции. Выпускник современной школы, который будет жить и трудиться в конкурентоспособном обществе, должен обладать определенными качествами личности, в частности, быть гибким в различных жизненных ситуациях; самостоятельно приобретать необходимые знания; уметь применять их на практике для решения поставленных задач; грамотно работать с информацией и рационально подбирать необходимое решение; осуществлять взаимный контроль и оказывать в сотрудничестве необходимую взаимопомощь [Полат 1999, 9].

Ключевым вопросом в модернизации образования является формирование функциональной грамотности (ФГ). Формирование ФГ не

представляется возможным при изучении научных дисциплин в разобщенном, оторванном друг от друга виде. В современных условиях необходимость организации межпредметных связей также актуальна, как и сотни лет назад. Ещё чешский педагог-гуманист Ян Амос Коменский говорил: «всё, имеющее между собой связь, и преподаваться будет в связи», указывая этим на интеграцию в обучении [Чеберяк 2021, 150].

В качестве главного итога обучения в школе, согласно ФГОС ООО и ФГОС СОО, выпускники должны демонстрировать наряду с предметными и личностными, также и метапредметные результаты [Приказ Министерства просвещения Российской Федерации от 31.05.2021 г. № 287 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта основного общего образования" 2021].

Понятие «метапредметность» имеет несколько смыслов. В дидактике чаще всего оно употребляется в значении «надпредметности», т.е. объема знаний, который формируется и используется не в процессе изучения какого-то определенного школьного предмета, а в ходе всего обучения. Метапредметные знания необходимы не только для решения образовательных задач, но и для применения их в различных жизненных ситуациях. Требования современного мира таковы, что привычных разрозненных знаний из разных наук, освоением которых занимаются дети в школе, уже недостаточно. Человек для постижения целостности картины мира должен уметь интегрировать информацию из источников, которые находятся на стыке двух, трёх, четырёх или более абсолютно разных областей знаний.

Основная задача современной школы состоит в том, чтобы поменять тип сознания и учеников, и учителей, помогая переходить к метапредметным связям, то есть к взаимосвязям разных предметов на более высоком, практическом уровне их применения в жизни. Метапредметный подход обеспечивает переход от существующей практики дробления знаний на предметы к целостному восприятию образу мира, к метадеятельности, что способствует воспитанию современной всесторонне развитой личности, которая сможет найти себя в мире.

Актуальность работы. Понимание, поиск, выстраивание метапредметных связей между различными науками является ключевым и неотъемлемым компонентом формирования целостной картины мира и инструментом развития ФГ. Для непрерывного формирования метадеятельности участников образовательного процесса необходимо

выявлять и углублять межпредметные связи между различными науками. Необходимость метапредметного подхода к обучению также связана с включением новых заданий в КИМ ГИА. Так, например, в модели единого государственного экзамена (ЕГЭ) по биологии особый акцент сделан на реализацию системно-деятельностного подхода и обеспечение разнообразия практико-ориентированных заданий (линии 2, 3, 23 и 24) для решения которых необходимы метапредметные знания.

Также междисциплинарные знания требуются при решении заданий линий 15, 18, 19, 20 в первой части и заданий линий 26 и 27 во второй части экзаменационной работы ЕГЭ, учитывающих тепловые явления в биологических системах. Именно задания линий 26 и 27, в которых требовалось дать развернутый аргументированный ответ и продемонстрировать способность применять теоретические знания для объяснения и обоснования биологических процессов и явлений, вызвали наибольшие затруднения в ЕГЭ по биологии 2023 г.

Цель работы – показать необходимость реализации метапредметного подхода к обучению биологии в школе на примере функционирования биологических систем, обусловленных законами термодинамики.

При рассмотрении примеров проявления физических явлений и законов в биологических системах необходимо понимать единый характер природных процессов, единство живой и неживой природы и уметь применять эти знания при решении практических задач.

Одним из важнейших свойств живых организмов является их способность улавливать, преобразовывать и запасать энергию в различных формах. Общие законы, определяющие превращения энергии, изучаются термодинамикой, описывающей процессы в физических и биологических системах на макроуровне. Начала термодинамики универсальны для живой и неживой природы.

Законы термодинамики и термодинамический метод исследования применяются в биологии для описания и изучения биологических систем:

- для разработки представлений об источниках энергии для процессов жизнедеятельности;
- для расчета параметров энергетических превращений в организме;
- для количественного анализа биологических процессов (дыхание, кровообращение, осмотические явления, диффузия, мышечные сокращения, генерация биопотенциалов);
- для определения КПД биологических процессов;

- для построения биологической теории эволюции.

Биологические системы представляют собой открытые макроскопические системы. С течением времени макросистемы могут перейти в равновесное или стационарное состояние. В равновесном состоянии параметры изолированной системы не зависят от времени. В стационарном состоянии открытой системы имеет место динамическое постоянство характеристик системы, происходит непрерывный обмен веществами и энергией между системой и окружающей средой. Например, гомеостаз – относительное постоянство внутренней среды организма, или терморегуляция – способность живых организмов поддерживать температуру тела в определенных границах. Терморегуляция непосредственно отображает все показатели гомеостаза организма и обеспечивает позитивную динамику смены равновесия – между окружающей средой и внутренней средой организма. Существование стационарных состояний характерно для живых систем, а переход в равновесное состояние – означает биологическую смерть организма.

В отличие от неживой природы, живые организмы для обеспечения своей жизнедеятельности всегда должны находиться в устойчивом неравновесном термодинамическом состоянии. Поэтому «любые изменения параметров внешней среды немедленно вызывают в живых организмах посредством обратных связей соответствующие изменения в протекании биологических процессов, направленных на сохранение устойчивого неравновесного термодинамического состояния» [Доброборский 2006, 35].

Это утверждение составляет суть термодинамического принципа динамического равновесия, принципа Ле-Шателье-Брауна. Если изменить одно из условий – температуру, давление или концентрацию веществ, – при которых данная система находится в состоянии химического равновесия, то равновесие сместится в направлении, которое препятствует этому изменению [Габриелян 2014]. Примерами таких процессов являются изменение диаметра зрачка в зависимости от уровня освещенности, колебание количества эритроцитов в зависимости от величины внешнего давления, изменение концентрации пигмента меланина в зависимости от интенсивности УФ излучения и многие др.

Первое начало термодинамики является обобщением закона сохранения энергии на тепловые процессы, согласно которому энергия не может быть создана или уничтожена, а возможно лишь ее превращение из одного вида в другой.

Особенность первого закона термодинамики в биологии заключается в том, что в живой системе работа не может совершаться за счёт притока теплоты извне, как в тепловой машине, она совершается за счёт изменения внутренней энергии системы при различных биохимических процессах [Термодинамика биологических процессов 2023].

Протекание любых жизненных процессов требует затрат энергии, и ни одна жизнь не может создавать энергию, но может получать ее через окружающую среду. Клетки организма выполняют ряд важных процессов, требующих энергетических затрат, – репликация ДНК, митоз, мейоз, движение клеток, эндоцитоз, экзоцитоз и апоптоз.

Главным источником энергии для всего живого является Солнце. На этапе фотосинтеза фотоавтотрофы (зеленые растения), имеющие уникальные ферментативные системы, способны трансформировать энергию солнечного света в энергию химической связи органических веществ (углеводов, липидов и т.д.). В процессе клеточного дыхания (биологического окисления органических веществ) эта энергия переходит в энергию АТФ. Аденозинтрифосфат (АТФ), в свою очередь, является универсальным аккумулятором энергии в клетке [Тейлор, Грин, Стаут 2022].

Взаимообмен энергией и веществом между живой и неживой природой является проявлением принципа единства и взаимосвязи материального мира. Макросистема, физическая или биологическая, может получать энергию в результате горения топлива или биологического окисления вещества.

Для правильного понимания этих процессов рассмотрим пример задания ЕГЭ по биологии.

Тип 26 № 16783 – «Объясните, в чём сходство и в чём различия биологического окисления органических веществ в клетке и процесса их горения в неживой природе».

Пояснение.

Сходство: происходит окисление органических веществ до конечных продуктов углекислого газа и воды.

Различие:

1) биологическое окисление происходит медленно, последовательно в процессе нескольких реакций, а горение – быстрый процесс в виде одной реакции;

2) при горении вся энергия выделяется в виде тепла (переходит в световую и тепловую), ничего при этом не запасается, а при биологическом

окислении часть энергии аккумулируется в молекулах АТФ в виде энергии химических связей;

3) эти процессы существенно различаются по сберегаемой энергии. При горении вся энергия переходит в световую и тепловую, ничего при этом не запасается. При клеточном дыхании запасается энергия в молекулах АТФ, которая впоследствии расходуется во всех процессах жизнедеятельности: синтезе органических веществ, росте, развитии, движении и др.

Между организмами в сообществах существуют механизмы передачи энергии от одного организма к другому.

Поток энергии в экосистемах осуществляется через сложный механизм, включающий процессы ассимиляции, накопления, транспорт и высвобождение энергии.

Передача энергии от одного звена экосистемы к другому лежит в основе трофической динамики. Пищевые (трофические) связи, образующие пищевые цепи, переплетаются в сложную сеть.

В отличие от растений и других фотосинтезирующих организмов, животные не могут генерировать энергию непосредственно из солнечного света. Чем выше организм находится в пищевой цепи, тем меньше доступной энергии он получает от своих источников пищи. Основная часть потребляемой с пищей энергии идет на обеспечение жизнедеятельности организма, поддержание рабочих процессов в клетках, и лишь сравнительно небольшая часть трансформируется в ткани самого организма, т.е. идет на увеличение массы, построение тела, рост и размножение. Продукты расщепления подлежат удалению из организма в составе экскретов и углекислого газа, образующегося при дыхании.

Энергетические затраты на поддержание всех метаболических процессов условно называют тратой на дыхание (т.е. на биологическое окисление). Траты на дыхание во много раз больше энергетических затрат на увеличение массы самого организма. Конкретные соотношения зависят от стадии развития и физиологического состояния особей. [Чернова, Былова 2004]. Иными словами, большая часть энергии при переходе из одного звена пищевой цепи в другое теряется, так как к следующему потребителю может поступить лишь та энергия, которая заключается в массе организма – предшественника в пищевой цепи. Таким образом, с одного трофического уровня экологической пирамиды на другой переходит около 10 % энергии. Последнее утверждение составляет суть правила Р. Линдемана [Экологические пирамиды. Правило Линдемана 2023]. Используя это

правило, можно рассчитать примерное количество энергии на любом трофическом уровне цепи питания, если ее показатель известен на одном из них.

Рассмотрим передачу энергии между частями экосистемы на примере задания ЕГЭ по биологии: «Детёныш обыкновенной лисицы, имея массу 1 кг, питался исключительно лесными полёвками, средняя масса которых составляла 25 г. Используя экологическое правило 10 %, подсчитайте, какое количество полёвок съел лисёнок для достижения им массы в 6 кг. В ответе запишите только количество полёвок».

Решение: прирост массы составляет 5 кг ($6-1=5$). Составляем цепь питания: растение – полевка – лиса. Согласно правилу экологической пирамиды, масса всех съеденных полевок в 10 раз больше: $5 \times 10 = 50$ кг. Масса одной полевки – 25 гр. (0,025 кг). Количество полевок = $50 : 0,025 = 2000$ полевок.

Второе начало термодинамики представляет собой закон об энтропии. [Базаров 1991]. Оно характеризует возможное направление развития макропроцессов, устанавливает существование энтропии как функции состояния термодинамической системы и вводит понятие абсолютной термодинамической температуры. Принцип обеспечения устойчивости неравновесного термодинамического состояния живых организмов (биологических систем) как на уровне клеток, так и на уровнях органов, систем и целостных организмов заключается в непрерывных чередованиях потребления и выделения энергии посредством управляемых циклов синтеза и расщепления ингредиентов, участвующих в биохимических реакциях [Доброборский 2006]. В неживой природе примеры периодических процессов – это круговорот веществ (воды и др.), смена времен года (циклические колебания температуры, давления и пр.).

В живой природе – это биоритмы: чередование бодрствования со сном, дыхание (вдох – выдох); кровообращение (артериальное систолическое и диастолическое давление, частота сердечных сокращений); работа мускулатуры (сокращение и расслабление мышц); реакции на внешние раздражители (на свет и звук) и т.д.

Часто ошибочно полагают, что функционирование живых организмов противоречит второму закону термодинамики, потому что живые организмы способны к самоорганизации, т.е. к уменьшению энтропии. Чтобы исправить это ошибочное мнение, необходимо понимать, что живые организмы и планета Земля в целом являются открытыми системами. Например, «человек

принимает пищу, расщепляет ее на компоненты, а затем использует их для создания клеток, тканей, связок и т. д. Этот процесс увеличивает порядок в организме и, таким образом, снижает энтропию. Однако люди также: 1) проводят тепло к одежде и другим предметам, с которыми они контактируют; 2) создают конвекцию из-за разницы в температуре тела и окружающей среды; 3) излучают тепло в космос; 4) потребляют энергосодержащие вещества (т. е. пища); 5) выделяют отходы (например, углекислый газ, воды и другие компоненты дыхания, мочи, кала, пота и т. д.).

Если принять во внимание все эти процессы, общая энтропия большей системы (то есть человека и его окружающей среды) увеличивается. Когда человек перестает жить, ни один из этих процессов (1-5) не происходит, и любое прерывание процессов (особенно 4 или 5) быстро приводит к заболеваемости и / или смертности. Таким образом, наблюдается выполнение второго закона термодинамики, и нет никакого парадокса возникновения и существования живых организмов вопреки глобальной тенденции Вселенной к увеличению «беспорядка» [Биологическая термодинамика 2022].

Коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение совершаемой полезной работы к величине затраченной энергии [Базаров 1991, 77]. Для животных организмов КПД зависит от вида деятельности, интенсивности нагрузок, состояния здоровья (во время болезни большое количество энергии расходуется на борьбу с возникшими нарушениями) и многих других факторов. Чем выше находится организм в экологической пирамиде, тем ближе функционирование такого организма к работе идеальной машины, тем выше КПД.

К примеру, КПД естественного фотосинтеза составляет всего 1-2 %, чего вполне хватает для поддержки медленного жизненного цикла растений. У травоядных млекопитающих коэффициент усвоения продуктов питания составляет 10 % [Иванов 2008].

КПД мышц человека колеблется в среднем от 15 до 25 %, КПД мышц ног — от 20 до 35 %, а рук — от 5 до 15 %. При тренировке он увеличивается у человека до 25-30 % и даже до 35 %, а у животных — до 50 %.

КПД любого организма, согласно теореме Карно, не может превышать КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно [Базаров 1991]. Наибольший КПД можно получить в случае, если в макросистеме происходит чередование процессов, протекающих при постоянной температуре (например, терморегуляция у теплокровных животных) и при постоянной энтропии, т. е. в отсутствие теплообмена с окружающей средой.

В процессе естественного отбора такие организмы, как теплокровные или всеядные, получили конкурентное преимущество.

Совместное применение первого и второго начала термодинамики позволяет дать объяснение механизмам адаптации живых организмов (фенотипической и генотипической).

Свойство фенотипической адаптации живых организмов основано на периодичности чередования фаз выделения и потребления энергии. Оно заключается в физических и биохимических изменениях в клетках, органах и организме в целом. Эти изменения направлены на сохранение устойчивого неравновесного термодинамического состояния при изменениях параметров внешней среды в больших диапазонах – температуры, атмосферного давления, химического состава среды обитания, концентраций питательных веществ, изменения уровня радиации и других условиях. Свойства фенотипической адаптации многоклеточных живых организмов определяются совокупными свойствами клеток, органов и систем, из которых они состоят, реагировать на те или иные нагрузки. Например, в результате тренировок организма человека у него может значительно увеличиться мышечная масса, физическая сила и выносливость, при смене места жительства происходит привыкание к другому климату, смене часовых поясов и другим нагрузкам.

Взаимосвязь объема и поверхности тела также является результатом адаптации и выработалась в процессе эволюции вида. Общая теплопродукция у эндотермных видов зависит от объема тела, а скорость теплоотдачи – от площади его поверхности. Согласно правилу К. Бергмана, при увеличении размеров организмов объем тела растет быстрее, чем его поверхность. Животные, обитающие в холодных регионах, имеют более крупные размеры тела по сравнению с обитателями теплых регионов. Это позволяет уменьшить теплоотдачу. В то же время, согласно правилу Дж. Аллена, уменьшение выступающих частей тела приводит к уменьшению относительной поверхности тела и способствует экономии тепла, следовательно, у видов, обитающих в холодных регионах, размеры выступающих частей тела (уши, хвост) меньше, чем у ближайших родственников в теплых регионах. Это позволяет снизить теплоотдачу в холодном климате и повысить теплоотдачу в теплом климате.

В качестве примера рассмотрим несколько заданий:

Задание 1. Императорский пингвин (*Aptenodytes forsteri*) обитает в Антарктиде и имеет среднюю массу около 30 килограммов, Галапагосский

пингвин (*Spheniscus mendiculus*) обитает в экваториальных широтах на Галапагосских островах и весит в среднем 2 килограмма. Сформулируйте экологическое правило К. Бергмана на данном примере. Какой физический принцип лежит в его основе? Какое преимущество дают обоим видам пингвинов такие размеры тела?

Ответ.

1. Чем ниже температура окружающей среды, тем крупнее размер пингвинов (чем выше температура среды, тем меньше размер пингвинов).
2. От значения отношения площади поверхности тела к его объёму (массе).
3. Зависит интенсивность теплоотдачи.
4. У крупных пингвинов (Императорских) значение отношения площади поверхности к объёму (массе) тела меньше.
5. Такое соотношение обеспечивает им более медленную теплоотдачу (эффективное сохранение тепла).
6. У мелких пингвинов (Галапагосских) значение отношения площади поверхности к объёму (массе) тела больше.
7. Такое соотношение обеспечивает им быструю теплоотдачу.

Задание 2. «В Якутии в слое многолетней мерзлоты были обнаружены хорошо сохранившиеся останки мамонта. Исследования показали, что мамонты были короткохвосты, а площадь их ушной раковины была в 15-20 раз меньше, чем у африканского слона. Этот пример является типичной иллюстрацией правила Аллена, описывающего взаимосвязь между строением тела теплокровного животного и климатом, в котором он живет. Какой физический принцип лежит в основе этого правила? Какие преимущества давали мамонтам такие особенности внешнего строения в их среде обитания? Почему под правило Аллена не подпадают почвенные млекопитающие, обитающие в разных климатических зонах? Укажите две причины» [Экология – Каталог задач ЕГЭ по Биологии 2022].

Элементы ответа.

1. Чем меньше площадь выступающих частей тела (поверхности тела), тем меньше потеря тепла (или наоборот).
2. В холодных условиях такое строение тела позволяет экономить (сохранять) тепло.
3. Уменьшается вероятность обморожения тела.
4. Почвенная среда характеризуется отсутствием температурных колебаний в разных климатических зонах.

5. Выступающие части тела мешают передвижению в почвенной среде (выступающие части тела, как правило, отсутствуют у почвенных животных).

Таким образом, использование метапредметного подхода при изучении биологии в школе позволяет глубже понять сложнейшие процессы, протекающие в биологических системах и, следовательно, способствует:

- развитию глубоких системных знаний у школьников при изучении биологических процессов и явлений разной сложности;
- расширению кругозора и интеллектуальных потребностей школьников;
- формированию исследовательских знаний и навыков;
- изучению сложного материала по предмету через разноуровневые практико-ориентированные задания;
- повышению результатов итоговой аттестации школьников по биологии.

Список литературы

1. Базаров И.П. Термодинамика. М. : Высшая школа, 1991. 377 с.
2. Биология: в 3 т. / Д. Тейлор, Н. Грин, У. Стаут ; под ред.Р. Сопера ; пер. с 3-го англ. изд. 14-е изд. М. : Лаборатория знаний, Т. 1. 2022. 454 с. Т. 2. 2021. 435 с. Т. 3. 2022. 451 с.
3. Габриелян О.С. Естествознание. 11 класс. М. : Дрофа, 2014. 334 с.
4. Доброборский Б.С. Термодинамика биологических систем. СПб. : СПбГМА им. И.И. Мечникова. 2006. 52 с.
5. Иванов К.П. Энергия и жизнь // Успехи современной биологии. 2008. Т. 128. № 6. С. 606-619.
6. Новые педагогические и информационные технологии в системе образования: Учеб. пособие для студ. пед. вузов и системы повыш. квалиф. пед кадров / Под ред. Е.С. Полат. М. : Издательский центр «Академия», 1999. 224 с.
7. Приказ Министерства просвещения РФ от 31.05.2021 N 287 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта основного общего образования" (Зарегистрировано в Минюсте России 05.07.2021 N 64101). URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107050027> (дата обращения: 24.05. 2023).
8. Термодинамика биологических процессов URL : <https://pandia.ru/text/78/262/86240.php> (дата обращения: 03.03. 2023).
9. Чеберяк М.И. Исследовательская деятельность обучающихся как

средство формирования межпредметных связей ОБЖ и биологии // Инновационные научные исследования. – 2021. – № 4-1(6). – С. 149-159.

10. Чернова Н.М., Былова А.М. Общая экология. М. : Дрофа, 2004. 416 с.

11. Экологические пирамиды. Правило Линдемана. URL : <http://profil.adu.by/mod/book/tool/print/index.php?id=1093> (дата обращения: 14.04. 2023).

12. Экология – Каталог задач ЕГЭ по Биологии. URL : <https://2.shkolково.online/catalog/1926/64308?SubjectId=12&ysclid=ljq9kf5ap4543965262> (дата обращения: 03.03. 2023).

References

1. Bazarov I.P. Termodinamika [Thermodynamics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1991. 377 p.

2. D. Taylor, N. Green, W. Staut [Biological science]. Ed. R. Soper. Moscow, Laboratoriya znaniy, vol. 1, 2022, 454 p, vol. 2, 2021. 435 p, vol. 3, 2022, 451 p (in Russian).

3. Gabrielyan O.S. Estestvoznaniye. 11 klass [Natural science. For 11th grade]. Moscow, Drofa, 2014, 334 p.

4. Dobroborskii B.S. Termodinamika biologicheskikh sistem [Thermodynamics of biological systems]. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskaya gosudarstvennaya meditsinskaya akademiya im. I.I. Mechnikova, 2006, 52 p.

5. Ivanov K.P. Ehnergiya i zhizn' [Energy and life], *Uspehi sovremennoj biologii*, 2008, vol. 128, no. 6, pp. 606-619.

6. Novye pedagogicheskie i informatsionnye tekhnologii v sisteme obrazovaniya [New pedagogical and information technologies in the educational system]. Ed. E.S. Polat. Moscow, Izdatel'skii tsentr Akademiya, 1999, 224 p.

7. Prikaz Ministerstva prosveshcheniya RF ot 31.05.2021 N 287 "Ob utverzhdenii federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo standarta osnovnogo obshchego obrazovaniya" [The order of the Ministry of Education of the Russian Federation of 31 May 2021 no. 287 "On approval of the Federal State Educational Standard of basic general education"], available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107050027> (accessed 24 May 2023). (In Russian).

8. Termodinamika biologicheskikh protsessov [Thermodynamics of biological processes], available at: <https://pandia.ru/text/78/262/86240.php> (accessed 03 March 2023). (In Russian).

9. Cheberyak M.I. Research activities of students as a means of forming inter-subject links of OBZH and biology, *Innovative scientific research*, 2021, no. 4-1(6), pp. 149-159 (in Russian).

10. Chernova N.M., Bylova A.M. Obshchaya ehkologiya [General ecology]. Moscow, Drofa, 2004, 416 p.

11. Ehkologicheskie piramidy. Pravilo Lindemana [Ecological pyramids. Lindeman's rule], available at: <http://profil.adu.by/mod/book/tool/print/index.php?id=1093> (accessed 14 April 2023). (In Russian).

12. Ehkologiya – Katalog zadach EGE po Biologii [Ecology. A task bank of the Unified State Examination in Biology], available at: <https://2.shkolkovo.online/catalog/1926/64308?SubjectId=12&ysclid=ljq9kf5ap4543965262> (accessed 03 March 2023). (In Russian).