



Радиационное охлаждение - современное состояние и перспективы развития

Е.А.Тимаков, В.В.Иванов

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых, Владимир*

Аннотация: Радиационное охлаждение — это инновационная и весьма многообещающая технология пассивного охлаждения, позволяющая поверхностям рассеивать тепло посредством инфракрасного излучения непосредственно в холодное космическое пространство. В отличие от традиционных методов охлаждения, требующих внешнего источника энергии, радиационное охлаждение работает автономно, предлагая устойчивую и энергоэффективную альтернативу по регулированию температуры. Этот естественный процесс привлек значительное внимание в последние годы из-за его способности смягчать растущие потребности в энергии, связанные с кондиционированием воздуха и охлаждением, которые вносят существенный вклад в глобальное потребление энергии и деградацию окружающей среды. Экспериментальные и имитационные исследования демонстрируют эффективность этих материалов в достижении охлаждения ниже окружающей среды в различных условиях окружающей среды. В этой научной статье представлен всесторонний анализ последних достижений в области материалов и систем радиационного охлаждения с упором на основные физические механизмы, инновации в конструкции и улучшение эффективности. Также оценивается работа радиационных охладителей в различных атмосферных условиях и их совместимость с существующими системами климат-контроля.

Ключевые слова: радиационное охлаждение, температура, атмосферное окно, кондиционирование, энергоэффективность, пассивное охлаждение, карбонат кальция, сульфид бария, нитрид бора, диоксид титана.

Целью этой статьи является информирование о будущих направлениях исследований и содействие развитию масштабируемых,

высокопроизводительных решений радиационного охлаждения для различных применений.

Введение: После промышленной революции население мира, промышленный потенциал и уровень жизни резко возросли, что привело к постоянному росту спроса на воду и энергию [1,2]. В то же время выбросы углерода в атмосферу в результате деятельности человека неуклонно растут и уже привели к повышению глобальной температуры на $1,1^{\circ}\text{C}$ [3, 4]. В результате, охлаждение становится все более необходимым практически во всех сферах нашей жизни, а одной из наиболее энергоемких частей современной инфраструктуры являются системы охлаждения [5]. Поэтому системы охлаждения с низкими выбросами углекислого газа и затратами на электроэнергию стали критически важными в свете растущих последствий изменения климата. Наша планета предоставляет решение для развития экономичных и экологически чистых технологий охлаждения: пассивное радиационное охлаждение, контролирующее энергетический баланс Земли [6, 7]. Излучение с длиной волны преимущественно от 8 до 13 мкм выбрасывается в холодный глубокий космос в результате процесса радиационного охлаждения [8]. Образование льда и росы на поверхностях, обращенных к небу в ночное время, является лишь одним из примеров того, как Земля демонстрирует свою способность к пассивному радиационному охлаждению [9, 10]. Исследователи работают над созданием материалов, которые полностью отклоняют солнечный свет обратно в космос и небо, постоянно генерируя длинноволновое излучение в результате естественного процесса охлаждения Земли [11].

Технология радиационного охлаждения основана на принципах излучения абсолютно черного тела и избирательной излучательной способности, которые определяют теплоизлучательные свойства материалов.

Последние достижения проложили путь к разработке покрытий с высокой излучательной способностью, современных наноструктурированных материалов и диэлектрических метаповерхностей, специально разработанных для оптимизации инфракрасного излучения и минимизации поглощения солнечного света. Эти материалы продемонстрировали способность достигать охлаждения даже под прямыми солнечными лучами, тем самым расширяя горизонты их практического применения. Например, в статье [12] обсуждается создание краски, аналогичной коммерческим краскам и обладающей высоким коэффициентом отражения солнечного света и излучательной способностью для радиационного охлаждения ниже температуры окружающей среды в течение дня. Для изготовления краски используются наполнители, состоящие из мела (CaCO_3) с широким гранулометрическим составом и высокой концентрацией. В полдень полевые испытания показали, что температура поверхности была на $1,7^\circ\text{C}$ ниже температуры окружающей среды, а мощность охлаждения превышает 37 Вт/м^2 . Также в статье описаны производство и оптические характеристики краски, конфигурации полевых испытаний, моделирование методом Монте-Карло, испытания на надежность, характеристики вязкости и анализ стоимости краски.

В свою очередь, в статье [13] описано создание легкой радиационно-охлаждающей краски с использованием гексагональных нанопластинок нитрида бора. Краска имеет двойное назначение: может излучать тепло и отражать солнечное излучение, обеспечивает охлаждение без необходимости использования электроэнергии. Многообещающие результаты получаются при проверке краски на водостойкость и долговечность. Авторы обращают внимание на возможное использование краски в отраслях, чувствительных к весу, таких как носимые устройства, космическое оборудование, автомобили и самолеты. В исследовании представлен подробный анализ оптических

свойств краски, включая отражение солнечного света и излучательную способность, а также представлены результаты полевых испытаний. Авторы также обсуждают потенциальные экологические и экономические выгоды от использования краски в различных целях.

Авторами статьи [14] раскрыта новая технология получения белого покрытия с высокой теплоизлучательной способностью и высокой отражательной способностью солнечного света без использования диоксида титана. С помощью этих покрытий вы можете эффективно снизить температуру на $7,8^{\circ}\text{C}$ ночью и на $7,1^{\circ}\text{C}$ под прямыми солнечными лучами в полдень. Кроме того, в зависимости от окружающей температуры самоадаптирующиеся цветные покрытия авторов для радиационного охлаждения и солнечного обогрева могут чередоваться между цветным и белым состояниями. Используя эти покрытия, появляется возможность регулировать температуру зданий и избавить их от скучного белого вида.

А в статье [15] обсуждается создание охлаждающей целлюлозы - нового материала с эффектом радиационного охлаждения, изготовленного из промышленно отбеленной целлюлозы. Демонстрируются высокие уровни инфракрасного излучения и отражения солнечного света охлаждающей целлюлозы, что обеспечивает потенциальную мощность охлаждения в дневное время $68,4 \text{ Вт/м}^2$. Согласно полевым экспериментам, охлаждающаяся целлюлоза может поддерживать температуру на 1-2 градуса Цельсия ниже температуры окружающего воздуха. В книге также рассматриваются возможные варианты использования охлаждающей целлюлозы в различных товарах, включая упаковку пищевых продуктов, автомобильные козырьки и строительные материалы. Кроме того, в тексте исследуются энергосберегающие и экологические последствия использования охлаждающей целлюлозы в качестве кровельного материала, демонстрируя потенциальное снижение потребления электроэнергии и

выбросов углекислого газа. Исследование также включает прогноз жизненного цикла для оценки воздействия производства охлаждающей целлюлозы на окружающую среду по сравнению с традиционными кровельными материалами.

Создание прозрачных солнечных элементов нейтральных цветов, охлаждающих эффектом радиационного охлаждения, является основной целью работы [16]. Отдельные области солнечных элементов из прозрачного кристаллического кремния были покрыты исследователями микромасштабным полидиметилсилоксановым покрытием с инвертированной пирамидальной структурой (MIPS-PDMS). Этот материал уменьшил повышение температуры устройства, уменьшил падение эффективности в зависимости от угла и улучшил светопоглощение. При среднем коэффициенте пропускания света, 20% прозрачные солнечные элементы со слоем MIPS-PDMS имели эффективность до 15,8%. Кроме того, пленка имела эффект радиационного охлаждения, в результате чего температура солнечных элементов упала на 16 градусов по Цельсию. В исследовании подчеркивается потенциал прозрачных солнечных элементов нейтрального цвета для использования в автомобилях и сооружениях.

Таким образом, исследователи [17] предложили использовать прозрачное двухслойное покрытие, которое состоит из отражающего слоя, прозрачного для коротковолнового инфракрасного света, и верхнего слоя с длинноволновым и средневолновым инфракрасным излучением для охлаждения окон в течение дня. В зависимости от местоположения здания, добавление верхнего излучателя может снизить температуру прозрачного отражающего слоя на 7 градусов Цельсия и привести к дополнительной экономии энергии для здания от 20 до 49 МДж на квадратный метр в год. Это составляет от 3% до 8% годового потребления энергии для охлаждения.

В этой [18] статье авторы представляют прозрачную мембрану с радиационным охлаждением, которая снижает парниковый эффект, не мешая фотосинтезу. Без вентиляции пленка может снизить внутреннюю температуру на $18,6^{\circ}\text{C}$, что может ускорить развитие урожая. Пленка дает надежду на устойчивое тепличное сельское хозяйство в теплом климате, демонстрируя возможность экономии энергии и воды. Исследование показывает, как пленка может повысить урожайность и качество урожая, одновременно продлевая время производства и не потребляя при этом дополнительной энергии.

Помимо радиационного охлаждения многие исследователи пытаются совместить его с солнечным отоплением, в зависимости от необходимой температуры. Например, исследователи [19] создали двустороннюю конструкцию, которая сочетает в себе солнечное отопление и направленное радиационное охлаждение в единую систему. Как в лабораторных, так и в полевых экспериментах они показали рекордно высокую локальную плотность охлаждения. Этот метод может одновременно сэкономить расходы на отопление и охлаждение, что может помочь зданиям и отоплению, вентиляции и кондиционирования воздуха работать более энергоэффективно.

В свою очередь, авторы статьи [20] рассматривается создание динамической панели остекления, которая может чередовать радиационное охлаждение и солнечное отопление. Панель остекления перспективна для использования в потолочных стенах, прозрачных крышах и мансардных окнах. Это может значительно снизить нагрузку на отопление и охлаждение зданий. Авторы использовали расчеты EnergyPlus для оценки возможной экономии энергии в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, когда панели динамического остекления размещаются в виде прозрачных крыш, а также провели внешние испытания для оценки тепловых характеристик панелей динамического остекления. Согласно полученным

данным, панели динамического остекления могут сократить ежегодное потребление энергии для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в офисных зданиях среднего размера на 23% в 15 различных регионах США. Исследование показывает, что созданная панель динамического остекления зданий имеет многообещающий потенциал для экономии энергии.

А в статье [21] рассматривается применение термоадаптивных солнечных или радиационных покрытий для уменьшения колебаний температуры космических аппаратов. Поскольку эти покрытия не увеличивают вес, объем или мощность космического корабля, ученые предлагают использовать их для пассивного контроля температуры на орбите. С помощью спутниковых тепловых моделей моделируются тепловые характеристики этих покрытий, демонстрируя колебания температуры всего в 5,3 градуса Цельсия. Исследование показывает, как сложные, высокоэффективные технологии пассивного контроля температуры могут быть реализованы в космосе. Авторы также рассказывают о трудностях и потенциальных результатах использования этих технологий в космических миссиях.

Большие перспективы открывает возможность управлять интенсивностью эффекта радиационного охлаждения. Так, в статье [22] рассматриваются технологии интеллектуального управления температурным режимом, такие как переключаемое радиационное охлаждение. Это решает проблемы, связанные с круглогодичным энергосбережением и потребностью в передовых технологиях адаптивного радиационного охлаждения. Кроме того, переключаемые системы радиационного охлаждения классифицируются в тексте как пассивные или активные системы в зависимости от механизма переключения режимов, который ими управляет. Чтобы обеспечить динамическое управление оптическими/тепловыми

характеристиками переключаемых устройств радиационного охлаждения под искусственными или естественными воздействиями, в статье подчеркивается необходимость адаптируемых конструкций материалов, конструкций и систем. Наконец, статья пропагандирует создание универсальных и эстетически привлекательных переключаемых систем радиационного охлаждения с ярким внешним видом.

В статье [23] рассмотрена электрическая регулировка радиационного охлаждения в условиях окружающей среды. Авторы используют электрическую регулировку радиационной охлаждающей способности устройств, чтобы показать управление температурой устройств при температуре окружающей среды. Идея заключается в использовании способности электрохимически регулировать теплопроводность полимера и, следовательно, охлаждающую способность. Электрохимически регулируя окислительно-восстановительное состояние и связанную с ним теплопроводность проводящего полимера, ученые демонстрируют, что температуру их устройств можно обратимо изменить. Результаты показывают, что различия в теплоизлучении устройств можно использовать для электрической регулировки их температуры при комнатной температуре, изменяя их способность выделять тепловое излучение. В исследовании также рассматриваются эффекты памяти, связанные с настройкой температуры, и скорость, с которой может регулироваться температура устройства. Авторы приходят к выводу, что потенциальные области применения будут расширены за счет демонстрации управления температурой в условиях окружающей среды путем электрической настройки радиационного охлаждения.

Радиационное охлаждение не единственный способ регулирования температуры, и в статье [24] описана новая конструкция охлаждения, которая значительно улучшает пассивное охлаждение за счет сочетания излучения,

испарения и теплоизоляции. Чтобы продемонстрировать температуру ниже влажного термометра со значительно меньшим потреблением воды, чем чистое испарение, авторы предлагают структуру охлаждения, которая синергетически объединяет теплоизоляцию, испарительное охлаждение и радиационное охлаждение. Результаты показывают, что эта инновационная конструкция охлаждения обеспечивает на 300 % большую мощность охлаждения окружающей среды, чем автономное радиационное охлаждение, и надежно обеспечивает температуру ниже температуры по влажному термометру даже под прямыми солнечными лучами при значительно меньших затратах на воду. В исследовании также подчеркиваются преимущества, которые могут существовать для сооружений и хранения продуктов питания даже во влажных зонах.

Авторы провели несколько испытаний, таких как тесты на мощность охлаждения и температуру, чтобы проверить функциональность схемы охлаждения. Результаты этих экспериментов показали, что новая схема охлаждения обеспечивает значительно более низкие температуры и более высокую мощность охлаждения по сравнению с традиционными методами охлаждения. В исследовании также представлены рекомендации по применению различных технологий пассивного охлаждения в широком диапазоне климатических условий, демонстрирующие потенциальные преимущества охлаждения для продления срока годности пищевых продуктов и экономии энергии в различных климатических зонах. В целом, исследование представляет новый подход к пассивному охлаждению, который потенциально может удовлетворить растущие мировые потребности в охлаждении с небольшими затратами электроэнергии и выбросов углекислого газа, предлагая значительные преимущества для теплового комфорта человека, хранения продуктов питания и экономии энергии.

Значительной проблемой исследования радиационного охлаждения является отсутствие стандартизированных методов испытаний, что постарались решить авторы в работе [25]. В статье рассматривается создание стандартизированной испытательной установки для исследования материалов, обеспечивающих пассивное радиационное охлаждение. Система контролирует температуру окружающей среды и интенсивность солнечного света, сочетая симулятор солнца с алюминиевым куполом, охлаждаемым жидким азотом. Чтобы облегчить сравнение материалов независимо от погоды, времени и места, авторы предлагают установку для определения характеристик пассивного охлаждения, которая обеспечивает стабильные и контролируемые условия. Конфигурация позволяет изучить, как температура окружающей среды и интенсивность солнца влияют на способность материала охлаждаться. В статье также рассматривается использование обратного MIR-фильтра для различения селективных и широкополосных излучателей. Данная конфигурация считается предварительным шагом на пути к единообразной процедуре тестирования материалов пассивного охлаждения.

В заключение стоит отметить, что радиационное охлаждение становится убедительным, устойчивым и энергоэффективным решением для удовлетворения растущего глобального спроса на управление температурным режимом. Интеграция этих инновационных материалов в различные области применения — от ограждающих конструкций зданий до солнечных панелей — подчеркивает практический потенциал радиационного охлаждения в снижении зависимости от традиционных систем кондиционирования и общего потребления энергии. Несмотря на значительный прогресс, еще предстоит решить несколько проблем, чтобы полностью реализовать широкое внедрение технологий радиационного охлаждения. К ним относятся оптимизация свойств материалов,

позволяющих противостоять различным условиям окружающей среды, улучшение масштабируемости производства и повышение экономической целесообразности крупномасштабного внедрения. Кроме того, изменчивость атмосферных условий и взаимодействие с другими климатическими факторами требуют разработки адаптивных и гибридных систем охлаждения, которые могут поддерживать эффективность в различных географических регионах и погодных условиях.

Будущие направления исследований должны быть сосредоточены на разработке новых материалов с превосходными профилями излучательной способности, передовых методах моделирования для прогнозирования долгосрочных характеристик и комплексных полевых исследованиях для проверки лабораторных результатов в реальных условиях. Кроме того, исследование гибридной интеграции радиационного охлаждения с другими технологиями пассивного и активного охлаждения может раскрыть синергетический эффект, еще больше повысить эффективность охлаждения и расширить сферу применения.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Литература

1. Дженблат С. С., Волкова О. В. Основы и перспективы применения пассивного радиационного охлаждения // Холодильная техника. 2019. № 9. С. 36 — 43.
2. Цой А. П., Грановский А. С., Цой Д. А. [и др.]. Моделирование работы установки с радиационным охлаждением для кондиционирования воздуха // Вестник Международной академии холода. 2019. № 3. С. 3-14. DOI: 10.17586/1606-43132019-18-3-3-14.

3. Камара С., Сулин А.Б. Аналитический обзор пассивных радиационных систем охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С.37-44

4. Цой А П., Грановский А С., Бараненко А В. [и др.]. Расчет величины эффективной холодопроизводительности холодильной системы, использующей охлаждающий эффект небосвода // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. С. 35-40.

5. Oliveira J. T., Hagishima A, Tanimoto J. Estimation of passive cooling efficiency for environmental design in Brazil // Energy and Buildings. 2009. Vol. 41, Issue 8. pp. 809-813. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.02.006.

6. Цой А П., Грановский А С., Мачуев Ю. И. [и др.]. Обзор проведенных экспериментальных исследований эффективного излучения холодильной системы в космическое пространство // Вестник Международной академии холода. 2015. № 3. С. 28-33.

7. The Future of Cooling. Paris: OECD, 2018. DOI: 10.1787/9789264301993-en.

8. Гусева Я. Э., Королёва Н. А. Энергоэффективность в системах кондиционирования воздуха с применением испарительного охлаждения // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2018. № 8 (200). С. 74-77.

9. Коченков Н. В. Проблема разработки научно-методических основ создания систем кондиционирования воздуха для помещений с разнохарактерными нагрузками // Вестник Международной академии холода. 2014. №. 3. С. 48-52.

10. Bokor B., Kajtar L., Eryener D. Nocturnal radiation: new opportunity in building cooling // Energy Procedia. 2017. No 112. pp. 118-125. DOI: 10.1016/j.egypro. 2017.03.

11. Цой А. П., Грановский А. С., Цой Д. А., Бараненко А. В. Влияние климата на работу холодильной системы, использующей эффективное



излучение в космическое пространство (часть 1) // Холодильная техника. 2014. № 12. С. 36-41.

12. Li X. et al. Full Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in Commercial-like Paints with High Figure of Merit // Cell Reports Physical Science. 2020. Vol. 1, № 10. P. 100221.

13. Felicelli A. et al. Thin layer lightweight and ultrawhite hexagonal boron nitride nanoporous paints for daytime radiative cooling // Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, № 10. P. 101058.

14. Wang T. et al. Scalable and waterborne titanium-dioxide-free thermochromic coatings for self-adaptive passive radiative cooling and heating // Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, № 3. P. 100782.

15. Zhu W. et al. Large-scale industry-compatible sub-ambient radiative cooling pulp // Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, № 11. P. 101125.

16. Lee K., Park J., Seo K. Neutral-colored transparent solar cells with radiative cooling and wide-angle anti-reflection // Cell Reports Physical Science. 2023. Vol. 4, № 12. P. 101744.

17. Zhou Z. et al. Transparent Polymer Coatings for Energy-Efficient Daytime Window Cooling // Cell Reports Physical Science. 2020. Vol. 1, № 11. P. 100231.

18. Zou H. et al. Eliminating greenhouse heat stress with transparent radiative cooling film // Cell Reports Physical Science. 2023. Vol. 4, № 8. P. 101539.

19. Zhou L. et al. Hybrid concentrated radiative cooling and solar heating in a single system // Cell Reports Physical Science. 2021. Vol. 2, № 2. P. 100338.

20. Zhao X. et al. Dynamic glazing with switchable solar reflectance for radiative cooling and solar heating // Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, № 4. P. 100853.

21. Dong K. et al. Reducing temperature swing of space objects with temperature-adaptive solar or radiative coating // Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, № 10. P. 101066.

22. An Y. et al. Switchable radiative cooling technologies for smart thermal management // Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, № 10. P. 101098.

23. Banerjee D. et al. Electrical tuning of radiative cooling at ambient conditions // Cell Reports Physical Science. 2023. Vol. 4, № 2. P. 101274.

24. Lu Z. et al. Significantly enhanced sub-ambient passive cooling enabled by evaporation, radiation, and insulation // Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, № 10. P. 101068.

25. Song Q. et al. A tailored indoor setup for reproducible passive daytime cooling characterization // Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, № 8. P. 100986.

References

1. Dzhlenblat S. S., Volkova O. V. Xolodil'naya texnika. 2019. № 9. pp. 36-43.

2. Czoj A. P., Granovskij A. S., Czoj D. A. [i dr.]. Vestnik Mezhdunarodnoj akademii xoloda. 2019. № 3. pp. 3-14. DOI: 10.17586/1606-43132019-18-3-3-14.

3. Kamara S., Sulin A.B. Vestnik Mezhdunarodnoj akademii xoloda. 2020. № 2. p.37-44

4. Czoj A. P., Granovskij A. S., Baranenko A. V. [i dr.]. Vestnik Mezhdunarodnoj akademii xoloda. 2014. № 3. pp. 35-40.

5. Oliveira J. T., Hagishima A, Tanimoto J. Energy and Buildings. 2009. Vol. 41, Issue 8. pp. 809-813. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.02.006.

6. Czoj A. P., Granovskij A. S., Machuev Yu. I. [i dr.]. Vestnik Mezhdunarodnoj akademii xoloda. 2015. № 3. pp. 28-33.7. The Future of Cooling. Paris: OECD, 2018. DOI: 10.1787/9789264301993-en.



8. Guseva Ya. E., Korolyova N. A. Santexnika. Otoplenie. Kondicionirovanie. 2018. № 8 (200). pp. 74-77.
 9. Kochenkov N. V. Vestnik Mezhdunarodnoj akademii xoloda. 2014. №. 3. pp. 48-52.
 10. Bokor B., Kajtar L., Eryener D. Energy Procedia. 2017. No. 112. pp. 118-125. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.
 11. Czoj A. P., Granovskij A. S., Czoj D. A., Baranenko A. V. Xolodil`naya texnika. 2014. № 12. pp. 36-41.
 12. Li X. et al. Cell Reports Physical Science. 2020. Vol. 1, No. 10. P. 100221.
 13. Felicelli A. et al. Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, No. 10. P. 101058.
 14. Wang T. et al. Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, No. 3. P. 100782.
 15. Zhu W. et al. Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, No. 11. P. 101125.
 16. Lee K., Park J., Seo K. Cell Reports Physical Science. 2023. Vol. 4, No. 12. P. 101744.
 17. Zhou Z. et al. Cell Reports Physical Science. 2020. Vol. 1, No. 11. P. 100231.
 18. Zou H. et al. Cell Reports Physical Science. 2023. Vol. 4, No. 8. P. 101539.
 19. Zhou L. et al. Cell Reports Physical Science. 2021. Vol. 2, No. 2. P. 100338.
 20. Zhao X. et al. Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, No. 4. P. 100853.
 21. Dong K. et al. Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, No. 10. P. 101066.
-



22. An Y. et al. Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, No. 10. P. 101098.

23. Banerjee D. et al. Cell Reports Physical Science. 2023. Vol. 4, No. 2. P. 101274.

24. Lu Z. et al. Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, No. 10. P. 101068.

25. Song Q. et al. Cell Reports Physical Science. 2022. Vol. 3, No. 8. P. 100986.

Дата поступления: 20.10.2024

Дата публикации: 5.12.2024