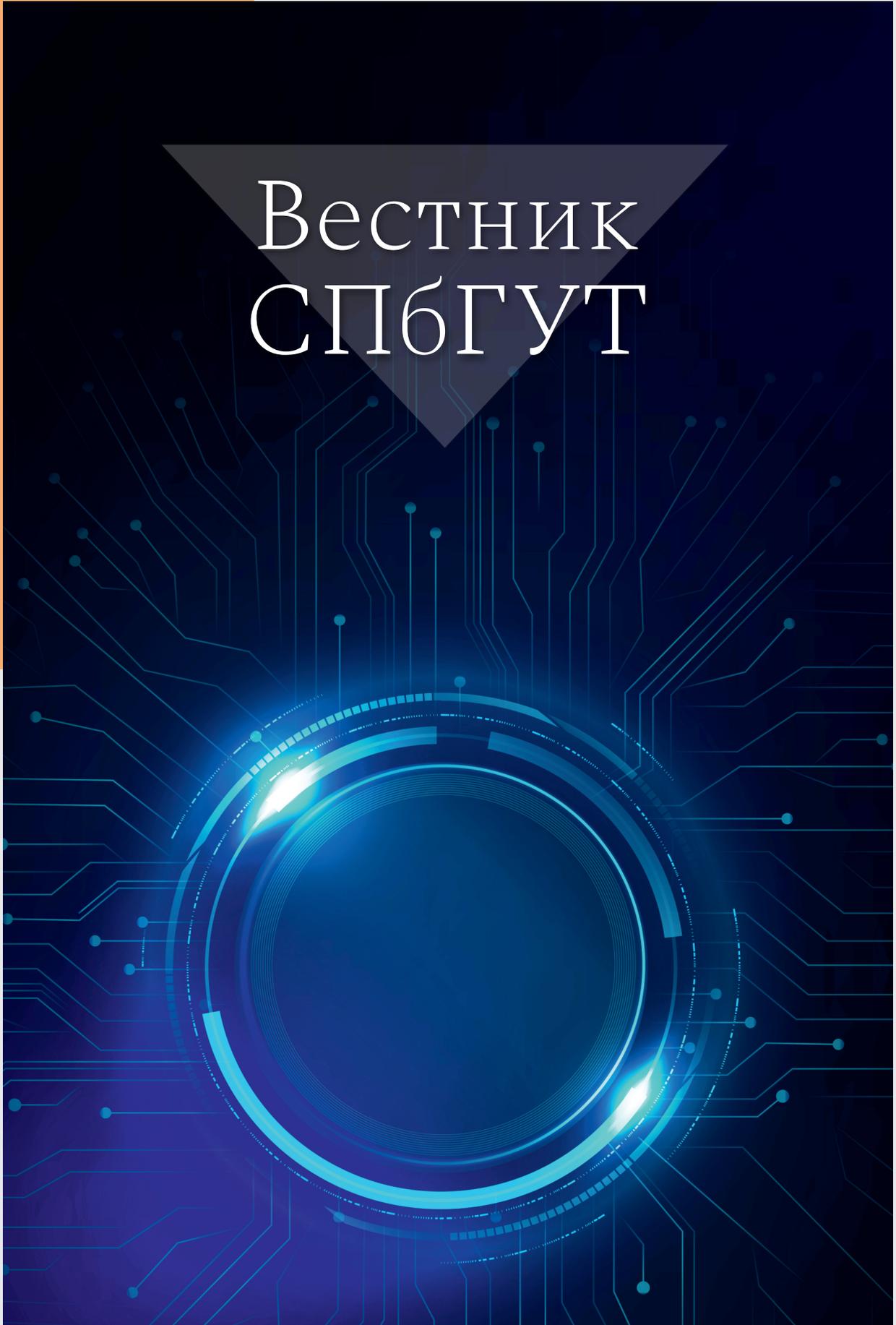


ISSN 3034-2201

# Вестник СПбГУТ

Том 1. № 2. 2023



Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

---

Научный журнал

**Вестник СПбГУТ**

Том 1. № 2

**Herald of SPbSUT**

Vol. 1. Iss. 2

Санкт-Петербург

2023

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Editorial Board

#### Главный редактор *Editor-in-Chief*

Владыко А.Г. (Санкт-Петербург)  
*Vladyko A.G. (St. Petersburg)*

Макаренко С.И. (Санкт-Петербург)  
*Makarenko S.I. (St. Petersburg)*

Гехт А.Б. (Санкт-Петербург)  
*Gekht A.B. (St. Petersburg)*

Дунайцев Р.А. (Санкт-Петербург)  
*Dunaytsev R.A. (St. Petersburg)*

Зикратов И.А. (Санкт-Петербург)  
*Zikratov I.A. (St. Petersburg)*

Калимуллина О.В. (Санкт-Петербург)  
*Kalimullina O.V. (St. Petersburg)*

Кирик Д.И. (Санкт-Петербург)  
*Kirik D.I. (St. Petersburg)*

Литвинов В.Л. (Санкт-Петербург)  
*Litvinov V.L. (St. Petersburg)*

Окунева Д.В. (Санкт-Петербург)  
*Okuneva D.V. (St. Petersburg)*

Симонина О.А. (Санкт-Петербург)  
*Simonina O.A. (St. Petersburg)*

Сотников А.Д. (Санкт-Петербург)  
*Sotnikov A.D. (St. Petersburg)*

Шутман Д.В. (Санкт-Петербург)  
*Shutman D.V. (St. Petersburg)*

Юрова В.А. (Санкт-Петербург)  
*Yurova V.A. (St. Petersburg)*

## СОДЕРЖАНИЕ

Арктический вектор внешней  
политики ФРГ  
Гехт А. Б., Неровный А. В.,  
Цверьянашвили И. А.

Метод управления мощностью  
в беспроводной двухуровневой  
гетерогенной сети  
Багаев Е. С.

Алгоритм оценки согласованности  
информационно-функциональных  
элементов графических  
пользовательских интерфейсов  
Вострых А. В.

Анализ вероятности проникновения  
нарушителя на объект через периметр  
Герлинг Е. Ю.

Анализ влияния легирования ванадия  
Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода  
Буланов В. Н.

## CONTENTS

1 Arctic Vector of German Foreign Policy  
Gekht A., Nerovnyj A., Tsvorianashvili I.

2 Power Management Method in a Wireless  
Two-Level Heterogeneous Network  
Bagaev E.

3 Algorithm for Evaluating the Consistency  
of Information and Functional Elements  
of Graphical User Interfaces  
Vostrykh A.

4 Analysis of the Probability of Intruder  
Penetration into the Facility through  
the Perimeter  
Gerling E.

5 Analysis of the Effect of Vanadium Doping  
Pd, Al, Co, Ni on Hydrogen Solubility  
Bulanov V.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций: Эл № ФС77-85553 от 28 июня 2023 г.

## КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Учредитель и издатель:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ)

**Адрес учредителя:** 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 61, литера А

**Адрес редакции:** 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2  
**Тел.:** +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022, +79643759970

**E-mail:** [vestnik@sut.ru](mailto:vestnik@sut.ru)  
**Web:** <http://vestnik-sut.ru>

УДК 327

## Арктический вектор внешней политики ФРГ

Гехт А. Б. ✉, Неровный А. В., Цверианашвили И. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Аннотация:** Арктический регион в силу ряда объективных причин играет все большую роль в современной системе международных отношений. Улучшение возможностей судоходства в связи с изменениями климатических условий, перспективы добычи полезных ископаемых, освоение новых территорий — все эти факторы ставят Арктический регион в центр внимания как арктических (Россия, Канада, США, Дания, Норвегия) и приарктических (Исландия, Швеция, Финляндия) государств, так и других крупных акторов международных отношений. Вполне закономерно, что ФРГ, обладая одной из мощнейших экономик и весомым политическим влиянием в Европейском Союзе, стремится принимать активное участие в международном диалоге по Арктике. Последнее десятилетие стало для Германии определяющим в плане разработки собственной арктической стратегии. В статье рассматриваются основные шаги немецкого правительства и других государственных структур в сфере арктической политики. Освещается деятельность представителей ФРГ в наиболее значимых международных организациях и форумах, занимающихся вопросами Арктического региона. Авторы анализируют основополагающие документы, в которых отражены направления арктической политики страны. Расширение международного сотрудничества в Арктике открывает Германии — стране с богатой историей полярных исследований — возможности для использования своих инновационных разработок, научного и технического опыта. Арктический регион может также выступать в качестве гаранта экономической безопасности и геополитического влияния ФРГ, поэтому следует ожидать дальнейшего роста вовлеченности страны в данный регион.

**Ключевые слова:** ФРГ, Арктика, внешняя политика, Арктический совет, арктическая политика

Обращаясь к вопросу арктической политики ФРГ, представляется верным начать с анализа основных вех присутствия этой страны в рассматриваемом регионе. Исследовательская деятельность Германии в Арктике началась еще в XIX в. Первые немецкие экспедиции были возглавлены К. Кольдевеем (1837–1908) в 1868 и 1870 гг., а в начале XX в. известный исследователь А. Вегенер (1880–1930), разработавший теорию континентального дрейфа, провел ряд экспедиций в Гренландии [1]. С тех пор Германия накопила весомый научный и технический опыт, став одним из мировых лидеров в области полярных исследований.

Постепенно возрастает вовлеченность Германии в международные структуры, занимающиеся арктическими вопросами. В 1921 г. страна присоединилась к Шпицбергенскому трактату, установившему суверенитет Норвегии над архипелагом Шпицберген, а странам-участницам договора предоставившему право на эксплуатацию его естественных ресурсов. Стратегическая ценность Шпицбергена привлекла к себе внимание немецкой стороны и в ходе Второй мировой войны: как известно, в 1943 г. немецкие вооруженные силы разрушили и советские, и норвежские поселки, расположенные на архипелаге [2]. Послевоенный период характеризуется активным сотрудничеством Восточной Германии с Советским Союзом в области совместных полярных исследований. Совместная научная работа ФРГ с

---

### Библиографическая ссылка на статью:

Гехт А. Б., Неровный А. В., Цверианашвили И. А. Арктический вектор внешней политики ФРГ // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 2. С. 1. EDN: JTVZQV

### Reference for citation:

Gekht A., Nerovnyy A., Tsverianashvili I. Arctic Vector of German Foreign Policy // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 2. P. 1. EDN: JTVZQV

СССР в данной области началась значительно позднее — с середины 80-х годов прошлого века. Длительные традиции международного научного сотрудничества СССР с ГДР и ФРГ остались актуальными и после объединения Германии, и после распада СССР и появления независимой Российской Федерации [3].

В 1991 г. Германия получила статус наблюдателя и принимала участие в подготовке Стратегии защиты окружающей среды Арктики (AEPS, аббр. от англ. Arctic Environment Prevention Strategy). Позднее, в 1998 г., ФРГ вошла в Арктический совет (АС, аббр. от англ. Arctic Council) в качестве аккредитованного наблюдателя, получив возможность участвовать в арктических проектах и оказывать ограниченное влияние на политику в регионе [4].

В последнее десятилетие, в связи с изменением климата (рисунок 1) и повышением глобального интереса к Арктике, исследования в данном регионе становятся все более значимыми для немецкого правительства. Федеральное министерство образования и научных исследований Германии [5] в 2012 г. присвоило арктическим исследованиям статус приоритетных во второй рамочной программе «Исследования в целях устойчивого развития» (FONA 2). В последующей, третьей рамочной программе (FONA 3), реализуемой с 2015 г., Арктика продолжает быть одним из ключевых направлений во внешнеполитической деятельности Германии [6].

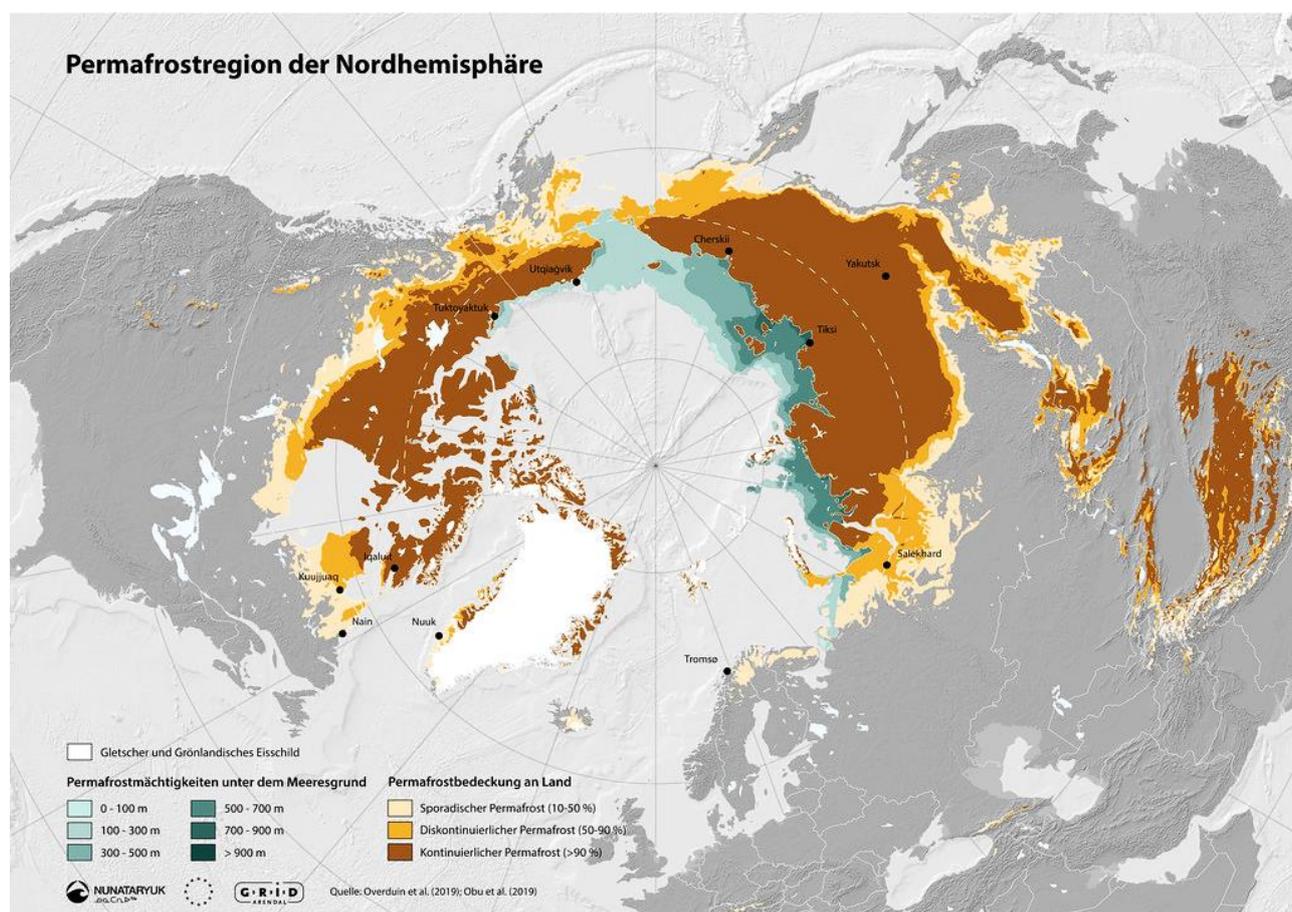


Рис. 1. Карта районов вечной мерзлоты, выполненная специалистами Института Альфреда Вегенера в 2020 г., отражающая актуальные климатические изменения в Арктике [7]

Министерство иностранных дел Германии тесно сотрудничает с исследователями с целью расширения участия немецких делегаций в различных рабочих, целевых и экспертных группах АС. ФРГ стремится максимально применить свой научный опыт для решения возникающих проблем и получения выгод в Арктике. В последние годы Германия становится все более активным участником международного сотрудничества в Арктике. Так, с 2008 по 2012 гг. немецкий ученый Г. В. Хуббертен был президентом Международной ассоциации по мерзлотоведению, а с 2008 по 2016 гг. представители Германии являлись ее исполнительными директорами [8]. С 2009 по 2016 гг. в Потсдаме находился секретарь

риат Международного арктического научного комитета (IASC, аббр. от англ. International Arctic Science Committee). Особо подчеркнем, что впервые в истории научного комитета секретариат находился в неарктической стране. Не будет большим преувеличением отметить, что к середине 2010-х гг. немецкое правительство начало активно заявлять о ФРГ как о государстве со значительным научным и техническим потенциалом, способном внести существенный вклад в решение проблем Арктики.

Представители Германии регулярно принимают участие в различных симпозиумах, посвященных проблемам Арктики, таких как форум «Арктические рубежи» (Arctic Frontiers) [9], ежегодный форум «Арктический круг» (Arctic Circle) [10] и во многих других мероприятиях, в том числе по линии Арктического совета, куда входят многие немецкие стратегические партнеры (рисунок 2). Международное сотрудничество по Арктике может открыть для ФРГ возможности использовать свои научные и инновационные разработки.

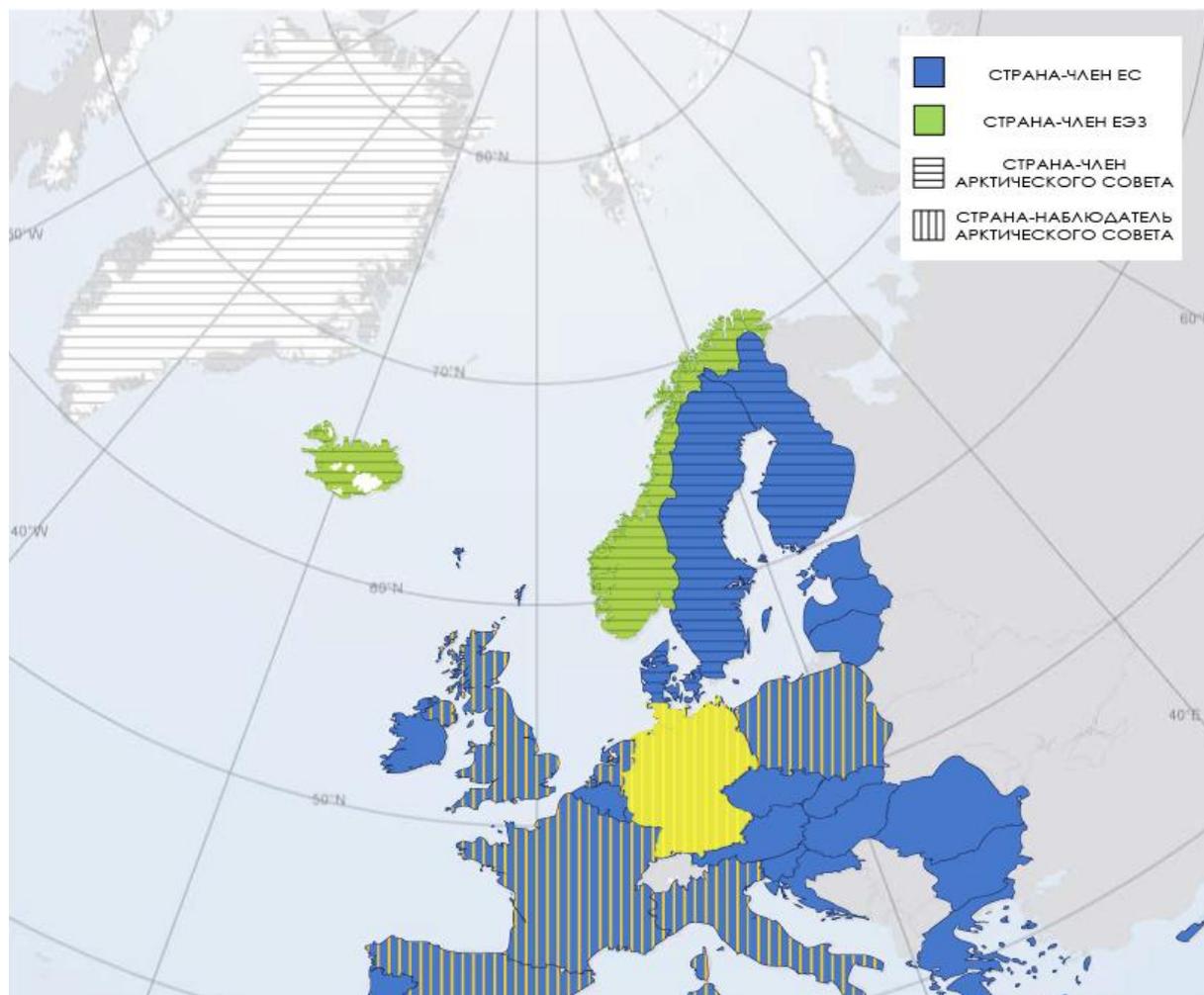


Рис. 2. Положение стран-членов ЕС и ЕЭЗ в Арктическом совете [11]

Если на рубеже XX–XXI вв. вопросы исследовательской деятельности ФРГ в Арктике были возложены на Федеральное министерство образования и научных исследований Германии, то с конца 2000-х гг. наблюдается широкое вовлечение в эту область других министерств. Сегодня арктической тематикой активно занимаются федеральные министерства иностранных дел, окружающей среды, охраны природы и ядерной безопасности, образования и научных исследований, экономики и энергетики [12].

Кроме того, Федеральное правительство смогло определить свою арктическую стратегию. В 2013 г. общее понимание целей Германии в Арктическом регионе нашло свое отражение в Руководящих принципах политики Германии в Арктике [13]; в 2019 г. основные цели были сформулированы в новых Руководящих принципах [14], что подтверждает стратегическую важность региона для ФРГ. Об-

ратившись к указанным документам, можно выделить основные направления интересов Германии в арктических широтах.

Прежде всего, особое внимание уделяется вопросам защиты окружающей среды. Деятельность по освоению Арктики должна основываться на высоких экологических стандартах с учетом интересов ее коренного населения. Федеральное правительство отмечает приверженность Германии итоговому документу Генеральной ассамблеи ООН «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» [14]. Ориентируясь на цели устойчивого развития, предложенные Организацией Объединенных Наций, ФРГ осуществляет комплекс действий по выявлению источников загрязнения окружающей среды в Арктике и стремится выработать план по сокращению масштабов выброса вредных веществ в регионе. Провозглашение курса правительства Германии на улучшение экологической обстановки в Арктике и предотвращение негативных последствий в ходе исследования и освоения региона подтверждается действиями на национальном, региональном и международном уровнях.

В связи с уязвимостью арктических экосистем, таяние льдов представляет собой большую угрозу для европейских стран, и среди немногочисленных инструментов влияния на нее можно назвать необходимость сокращения парниковых газов. Именно поэтому Федеральное министерство окружающей среды, охраны природы и ядерной безопасности ФРГ представило в 2016 г. «План по защите климата до 2050» [15], согласно которому намечен курс на снижение выбросов парниковых газов в Германии на 55–56 % к 2030 г. по сравнению с уровнем выбросов в 1990 г. А уже к середине нынешнего столетия ФРГ намеревается нейтрализовать воздействие выбросов парниковых газов, сократив их на 80–95 %. Важной промежуточной отметкой, отражающей реалистичность поставленных целей и эффективность выбранных подходов к их достижению, должен был стать 2020 г. Обратимся к нынешнему положению дел Германии в этой области. Согласно намеченным целям, к концу 2020 г. количество выбросов должно было сократиться не менее, чем на 40 % (рисунок 3).

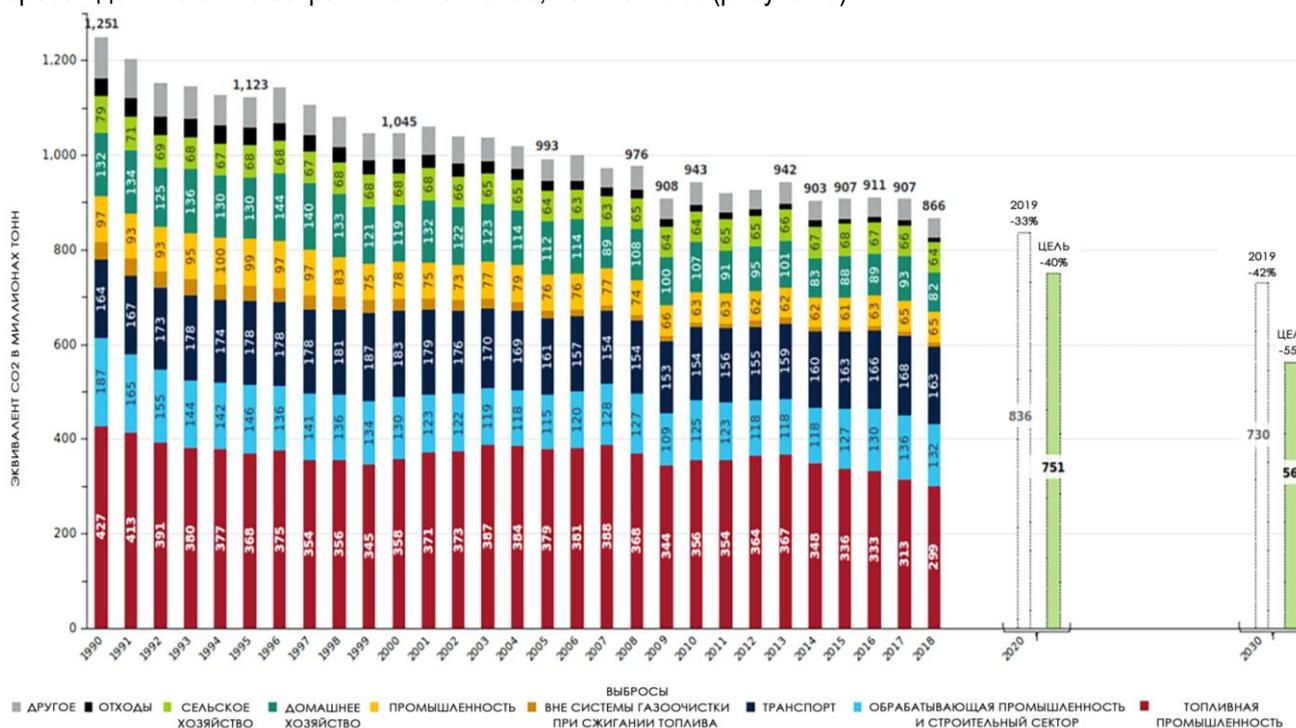


Рис. 3. Объемы выбросов углекислого газа в Германии по секторам, 1990–2018 [16]

К 2018 г. уровень выбросов углекислого газа в ФРГ достиг отметки 866 млн т, что представляет собой сокращение на 35,7 % в сравнении с 1990 г. [17]. Наряду с активными действиями Федерального правительства Германии, экономические последствия, вызванные мерами по контролю за распространением коронавирусной инфекции в 2020 г., дают основания полагать, что уровень выбросов углекислого газа продолжит сокращаться. Однако в действиях ФРГ по предотвращению изменения климата существуют проблемные отрасли, например, транспортная, выбросы в которой в сравнении с 1990 г. в

Германии сократились лишь на 0,6 %. Выбросы в транспортном секторе должны сократиться до уровня не более 98 млн т к 2030 г. [15], что никак не соответствует нынешним темпам сокращения выбросов и означает необходимость пересмотра запланированных цифр, выработки комплекса мер по дополнительному сокращению выбросов.

ФРГ принимает активное участие в деятельности Комиссии по защите морской среды Северо-Восточной Атлантики (OSPAR Convention, *аббр. от англ.* Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic) и Хельсинской комиссии (HELCOM, *аббр. от англ.* Helsinki Commission). Федеральное правительство Германии выступает в качестве значимого игрока в борьбе с морским мусором и поддерживает разработку регионального плана действий, включающего контроль ситуации в Арктическом регионе [15].

На международном уровне Германия взяла на себя обязательство сократить объем выбросов вредных веществ и, в соответствии со Стокгольмской и Минаматской конвенциями, реализует деятельность по предотвращению и сокращению выбросов стойких органических загрязнителей и ртути в окружающую среду. Стокгольмская конвенция была ратифицирована Германией в 2002 г. и вступила в силу на территории страны с 2004 г. [18], Минаматская конвенция была ратифицирована в 2017 г. [19].

В рамках деятельности, направленной на защиту окружающей среды, Германия также заинтересована в создании сети морских охраняемых районов в целях сохранения биоразнообразия Арктического региона. Так, например, ФРГ поддерживает проекты рабочей группы АС по сохранению арктической флоры и фауны (CAFF, *аббр. от англ.* Conservation of Arctic Flora and Fauna), в том числе проект «Инициатива по перелетным птицам Арктики» (АМБИ, *аббр. от англ.* Arctic Migratory Birds Initiative), который направлен на улучшение состояния сокращающихся популяций мигрирующих птиц в Арктическом регионе на долгосрочной основе [15]. Помимо этого, немецкой стороной регулярно высказывается намерение о поддержке научных исследований по решению экологических и климатических проблем в регионе, подчеркивается необходимость достижения устойчивого экономического развития в Арктике на основе разумного использования ресурсов и экологической экспертизы [14].

Тем не менее, не следует оставлять без внимания потенциальные возможности Германии в получении экономических выгод от региона. Природные ресурсы Арктики могут внести значимый вклад в повышение энергетической безопасности Германии. В освоении Арктики ФРГ видит возможность для роста спроса на специализированные технологии, в разработке которых немецкие компании имеют огромный потенциал. Ввиду того, что ФРГ обладает третьим по величине торговым флотом и крупнейшим в мире контейнерным морским флотом [14], а немецкие судостроительные верфи и предприятия специализируются на производстве морской техники, специальных судов (в том числе ледового класса) и морского высокотехнологичного оборудования, свободное судоходство в Арктике представляется ей крайне перспективным. Северо-Западный проход и Северный морской путь (СМП) способны в значительной степени облегчить и удешевить грузоперевозки этой страны. Так, например, расстояние от Гамбурга до одного из крупнейших портовых городов Японии — Иокогамы по СМП составляет около 12 000 км, в то время как через Суэцкий канал данный маршрут увеличивается до 21 100 км (рисунок 4). Для преодоления пути от Гамбурга до Шанхая потребуется около 20 000 км через Суэцкий канал и около 15 700 км по арктическому маршруту [20]. Улучшение судоходных условий Северного Ледовитого океана также создает предпосылки для повышения спроса на мировом рынке на инновационное судостроение, соответствующее высоким экологическим стандартам.

В официальных документах отмечается важность арктических научных исследований. Правительство Германии выражает намерение продолжать поддержку деятельности Федерального министерства образования и научных исследований Германии. В рамочных программах «Исследования в целях устойчивого развития» (FONA) Арктика рассматривается как одно из ключевых направлений [15]. Правительство ФРГ подчеркивает основополагающую роль в исследовании Арктики следующих национальных институтов: Институт полярных и морских научных исследований имени Альфреда Вегенера, оснащенный новейшим исследовательским судном Polarstern (рисунок 5), Гельмгольцский центр океанологических исследований, Федеральное ведомство геологических наук и натуральных ресурсов, Германский центр авиации и космонавтики [15].

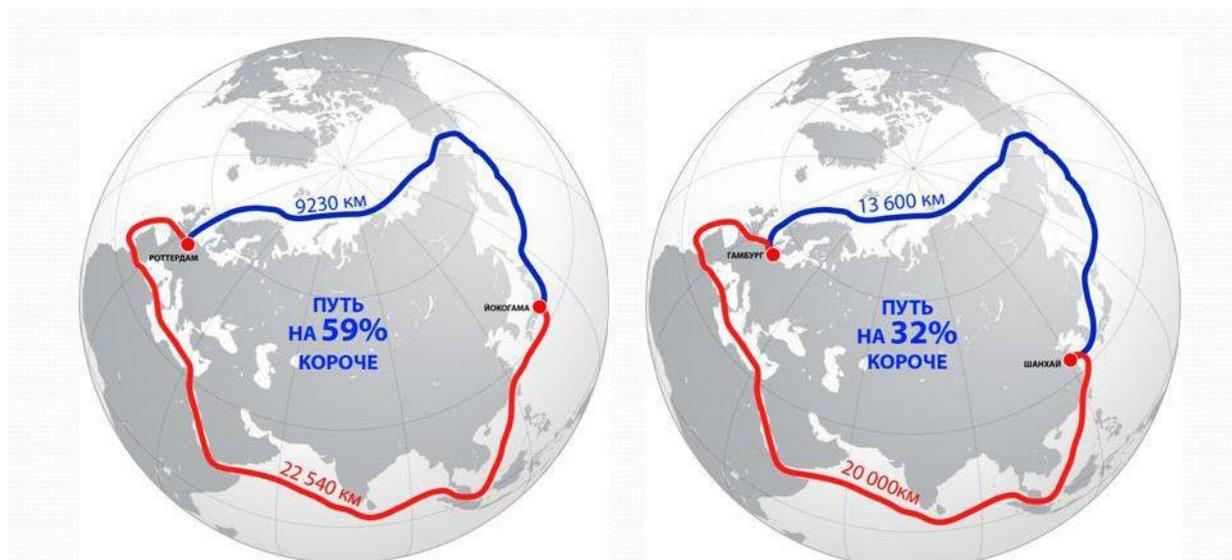


Рис. 4. Логистическое преимущество северного морского пути по сравнению с маршрутом через Суэцкий канал [21]



Рис. 5. Немецкий исследовательский ледокол Polarstern [22]

Рассмотрев основополагающие документы в области арктической политики ФРГ, можно утверждать, что правительство Германии придерживается позиции расширения международного сотрудничества в трех областях: а) обмен исследовательскими данными; б) прогнозирование региональных и глобальных изменений, предотвращение угроз и ликвидация последствий; в) решение проблем, с которыми сталкиваются жители Арктики в связи с глобальными изменениями. Арктические исследования Германии основаны на программе Федерального правительства «MARE:N — прибрежные, морские и полярные исследования в интересах устойчивого развития» [23], одной из главных задач которой является оценка и прогнозирование потенциальных локальных и глобальных последствий изменения климата в Арктике, информирование и привлечение внимания научного сообщества, политиков,

широкой общественности к существующим проблемам с целью дальнейшей разработки стратегий устойчивого развития на национальном, европейском и международном уровнях.

Немаловажным фактором политики Германии является международное сотрудничество в арктическом регионе. Федеральное правительство выступает против милитаризации Арктики и привержено многостороннему сотрудничеству в целях мирного разрешения споров в регионе. ФРГ признает АС в качестве единственного полномасштабного регионального форума и межправительственного органа, ответственного за принятие решений на высшем уровне по Арктике [15]. Несомненно, Германия заинтересована в усилении своей роли в АС и поддерживает активную арктическую политику Европейского Союза (ЕС), стремясь к горизонтальной согласованности внешней политики по данному вопросу. Укрепление позиций Германии в качестве наблюдателя в АС реализуется через вовлечение немецких экспертов и представителей органов власти в деятельность всех рабочих групп Совета. Опыт Германии в области полярных исследований и защиты окружающей среды является конкурентным преимуществом государства перед остальными странами-наблюдателями АС. Правительствами Германии и других стран предполагается выделение средств на развитие совместных научно-исследовательских проектов под эгидой АС. Кроме того, развитие двусторонних отношений Германии с арктическими государствами, а также с другими странами-наблюдателями АС создает возможность для обсуждения и обмена мнениями по арктической политике [15].

Федеральное правительство Германии регулярно отмечает свою приверженность различным международным правовым документам, касающимся Арктики, например, Международному соглашению по предотвращению загрязнения моря судами (MARPOL Convention), Конвенции ООН по морскому праву (UNCLOS, *аббр. от англ. United Nations Convention on the Law of the Sea*), Международному кодексу для судов, эксплуатируемых в Полярных водах (Полярный кодекс, *от англ. Polar Code*), Конвенции о защите морской среды северо-восточной Атлантики (OSPAR Convention), соглашениям Комиссии по рыболовству в северо-восточной части Атлантического океана (NEAFC, *аббр. от англ. North-East Atlantic Fisheries Commission*) [15].

В документах по арктической политике ФРГ прослеживается обеспокоенность растущим напряжением, связанным с пересекающимися интересами арктических государств, за отдельные территории Арктического региона, освоение морского дна и добычу природных ресурсов, установление статуса и правил использования Северо-Западного прохода и Северного морского пути [14].

Данные вопросы также вызывают активные обсуждения и дискуссии на страницах крупных изданий Германии. Журналистами немецкого издания Spiegel International, допускается возможность, что гонка за арктическими ресурсами может возникнуть не только между арктическими государствами, но и другими крупными акторами международных отношений, например отмечается явная намеренность Китая заявить о себе в этом регионе через расширение сотрудничества в научно-исследовательских проектах, проектах по защите окружающей среды, развитие судоходства, а также недвусмысленные заявления на официальном уровне о фактически «приарктическом» статусе (Near-Arctic State) государства на основании близости северо-восточных территорий страны к Полярному кругу [24]. Перечисленные точки напряжения, несомненно, ставят под угрозу экономическую и экологическую стабильность, а также угрожают уверенному курсу политики безопасности в регионе, тем самым затрагивается обороноспособность Германии.

В контексте политики безопасности ФРГ выступает за мирное освоение Арктического региона, но при этом ориентируется на реализацию различных форматов НАТО по развитию партнерства, предусматривающих организацию активного диалога между приграничными странами.

Однако в немецкой прессе можно найти примеры противоположной точки зрения, указывающей на спорную эффективность военно-политических действий ФРГ в Арктическом регионе с позиций мирного урегулирования конфликтов и уменьшения уровня напряженности. На страницах газеты *Junge Welt* высказывается обеспокоенность усилением активности ЕС и НАТО в регионе при непосредственном участии Германии, что приводит к повышению уровня милитаризации Арктики [25]. Заметим, что в сети Интернет национальную арктическую стратегию готовы активно освещать не только немецкие СМИ [26], но и представители Норвегии [27], Исландии [28]. О важности Германии в Арктике говорили и коллеги из Финляндии, в том числе во время визита Ф.-В. Штайнмайера в Хельсинки в 2018 г. [29].

Немецкие власти рассматривают Стратегию морской безопасности ЕС в качестве основы для регулирования международных отношений в Арктическом регионе. Что касается вопроса о защите свободы судоходства в арктических водах, ФРГ ориентируется на положения Конвенции ООН по морскому праву [15].

Федеральное правительство Германии уделяет немалое внимание и интересам коренных народов Арктики, особенно уважению и реализации их права на свободу и самоопределение. Признается необходимость следования положениям Декларации ООН о правах коренных народов (UNDRIP, *аббр. от англ. United Nations Declaration on the Rights of Indigenous Peoples*). ФРГ поддерживает решение АС о присвоении статуса постоянных участников шести организациям коренных народов (Международной ассоциации алеутов, Арктическому совету атабасков, Международному совету гвичинов, Циркумполярному совету инуитов, Ассоциации коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации, Союзу саамов), что позволяет коренному населению участвовать в принятии решений АС в качестве равноправной стороны. Немецкое правительство подчеркивает необходимость особого внимания к вопросам охраны окружающей среды, сохранения культурной идентичности и согласования вопросов территориальных притязаний коренного населения, а также участия народов, населяющих Арктику, в хозяйственно-экономическом использовании региона. Отмечается, что рабочие группы АС должны учитывать традиционные знания коренных народов и использовать их опыт на благо освоения региона [15].

Немаловажным событием должен стать грядущий арктический форум «Полярный круг», запланированный на май 2024 г. [30]. Он не только соберет многочисленных экспертов, представителей государственной власти и исследователей, но и предложит участникам собственную инновационную медиа-платформу — подкасты, видео- и фотосъемка, онлайн-трансляции и вебинары — для обмена мнениями.

### Выводы

Арктическая стратегия и политика Германии за последнее десятилетие приобрели четкую форму, их основные цели и направления были отражены в ряде государственных документов. Приоритет отдается вопросам защиты климата, международного сотрудничества, устойчивого развития экосистемы Арктики, прав коренных народов. Федеральное правительство Германии осуществляет деятельность по указанным направлениям на национальном, региональном и международном уровнях. Тем не менее прослеживается очевидное стремление к достижению собственных геополитических и геоэкономических интересов. Наблюдается тенденция к предоставлению государством гарантированного доступа своим компаниям к минерально-сырьевым ресурсам, транспортной инфраструктуре Арктического региона, обеспечению условий для наращивания объемов производства в судостроительной промышленности. Провозглашается намерение по усилению роли Германии в регионе через участие в деятельности рабочих групп АС, а также развитие двусторонних отношений с арктическими государствами и странами-наблюдателями АС. Правительство ФРГ, ориентируясь на общую политику ЕС, продвигает и отстаивает стратегические интересы ЕС в АС, тем самым преследуя цель оказать влияния на решение международных проблем, связанных с Арктическим регионом.

### Литература

1. Murphy D. T. German Exploration of the Polar World: A History, 1870–1940. Lincoln and London: University of Nebraska Press, 2002. 273 p.
2. Arlov T. B. Svalbards Historie. Trondheim, 2003. PP. 397–403.
3. Белов В. Б. Стратегия Германии в Арктике // Арктика и Север. 2016. № 24. С. 96–104. EDN: WJKLFR
4. Котов А. В. Арктический вектор внешней политики Германии // Научно-аналитический вестник Института Европы РАН. 2021. № 2 (20). С. 48–54. EDN: CUIYEM
5. Federal Ministry of Education and Research. URL: <https://www.bmbf.de/en/index.html> (дата обращения 14.04.2023)
6. Research for Sustainable Development — FONA 3 // Federal Ministry of Education and Research. 2016. URL: [https://www.fona.de/medien/pdf/pdf\\_8rch1v/bmbf\\_fona3\\_2016\\_englisch\\_barrierefrei.pdf](https://www.fona.de/medien/pdf/pdf_8rch1v/bmbf_fona3_2016_englisch_barrierefrei.pdf) (дата обращения 25.09.2023)

7. Permafrostregion der Nordhemisphäre (Permafrost in the Northern Hemisphere: German) // GRID-Arendal. URL: <https://www.grida.no/resources/13617> (дата обращения 25.09.2023)
8. Executive Committee History of the International Permafrost Association // International Permafrost Association. URL: <https://ipa.arcticportal.org/about-the-ipa/officers> (дата обращения 24.08.2023)
9. Past Conferences Achieve // Arctic Frontiers. URL: <https://www.arcticfrontiers.com/conference> (дата обращения 10.10.2023)
10. The Board of the Article Circle // Article Circle. URL: <http://www.arcticcircle.org/about/board> (дата обращения 10.10.2023)
11. Журавель В. П. Арктика как постоянно развивающееся многомерное пространство // Арктика и Север. 2018. № 31. С. 62–79. EDN: UUCEDK
12. National Arctic Strategy // Strategic Assessment of Development of the Arctic. URL: <https://www.arcticinfo.eu/en/germany> (дата обращения 10.10.2023)
13. Guidelines of the Germany Arctic Policy: Assume Responsibility, Seize Opportunities // Federal Foreign Office. 2013. URL: [https://www.arctic-office.de/fileadmin/user\\_upload/www.arctic-office.de/PDF\\_uploads/Germanys\\_Arctic\\_policy\\_guidelines.pdf](https://www.arctic-office.de/fileadmin/user_upload/www.arctic-office.de/PDF_uploads/Germanys_Arctic_policy_guidelines.pdf) (дата обращения 14.04.2023)
14. Germany's Arctic Policy Guidelines: Assuming Responsibility, Creating Trust, Shaping the Future // The Federal Government. 2019. URL: <https://www.auswaertiges-amt.de/blob/2240002/eb0b681be9415118ca87bc8e215c0cf4/arktisleitlinien-data.pdf> (дата обращения 14.04.2023)
15. Climate Action Plan 2050: Principles and goals of the German government's climate policy // Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety. 2016. URL: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzplan\\_2050\\_en\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzplan_2050_en_bf.pdf) (дата обращения 25.09.2023)
16. Greenhouse Gas Emissions Decreased in Germany by 42% Compared to 1990 Levels // Climate Scorecard. URL: <https://www.climatecorecard.org/2020/12/greenhouse-gas-emissions-decreased-in-germany-by-42-compared-to-1990-levels> (дата обращения 23.01.2023)
17. Climate Action in Figures: Facts, Trends and Incentives for German Climate Policy // Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. 2020. URL: [https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user\\_upload/china/media\\_elements/Documents/German\\_Climate\\_Action\\_in\\_Figures.pdf](https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/Documents/German_Climate_Action_in_Figures.pdf) (дата обращения 23.01.2023)
18. Status of Ratification of Stockholm Convention // Stockholm Convention. URL: <http://chm.pops.int/Countries/StatusofRatifications/PartiesandSignatoires/tabid/4500/Default.aspx> (дата обращения 25.09.2023)
19. Parties and Signatories of Minamata Convention of Mercury // Minamata Convention of Mercury. URL: <http://www.mercuryconvention.org/Countries/tabid/3428/Default.aspx> (дата обращения 25.09.2023).
20. Wergeland T. Arctic Shipping Routes – Cost Comparisons with Suez // ARCTIS Database. 2010. URL: <http://www.arctis-search.com/Arctic+Shipping+Routes+--+Cost+Comparisons+with+Suez> (дата обращения 12.10.2023)
21. Северный морской путь – экономия времени и безопасность // ИА Реалист. URL: <https://realtribune.ru/news-economics-1108> (дата обращения 25.09.2023)
22. German Polar Research // Arctic Science. URL: [https://www.arcticsscienceministerial.org/arctic/en/science/german-polar-research/german-polar-research\\_node.html](https://www.arcticsscienceministerial.org/arctic/en/science/german-polar-research/german-polar-research_node.html) (дата обращения 12.10.2023)
23. Mare:N – Coastal, Marine and Polar Research for Sustainability // Federal Ministry of Education and Research. 2020. URL: [https://www.bmbf.de/upload\\_filestore/pub/MARE\\_N\\_englisch.pdf](https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/MARE_N_englisch.pdf) (дата обращения 25.09.2023)
24. Seidler C. China Dips Toes in Arctic Waters // Spiegel International. 2013. URL: <https://www.spiegel.de/international/world/growing-chinese-interest-in-the-arctic-worries-international-community-a-879654.html> (дата обращения 12.10.2023)
25. Kronauer J. Berlin mischt mit: Militarisierung der Arktis auch mit Hilfe der BRD // Junge Welt. 2020. URL: <https://www.jungewelt.de/artikel/384010.arktis-berlin-mischt-mit.html> (дата обращения 12.10.2023)
26. New Perspectives on the Far North // Konrad-Adenauer-Stiftung. URL: <https://www.kas.de/en/web/auslandsinformationen/artikel/detail/-/content/neuer-blick-nach-norden> (дата обращения 12.10.2023)
27. «Preserve and Protect» Germany's Arctic Policy Calls for More Restrictions in the Arctic and Receives Mixed Reactions // High North News. URL: <https://www.highnorthnews.com/en/germanys-arctic-policy-calls-more-restrictions-arctic-and-receives-mixed-reactions> (дата обращения 12.10.2023)

28. Basse D. Germany: A new (non-)Arctic power? // Arctic Portal. URL: <https://arcticyearbook.com/arctic-yearbook/2019/2019-scholarly-papers/319-germany-a-new-non-arctic-power> (дата обращения 20.10.2023)
29. Freedom of Trade and Arctic on the Agenda as President of the Federal Republic of Germany visits Finland // Arctic Economic Council. URL: <https://arcticeconomiccouncil.com/wp-content/uploads/2018/09/2018-09-17-Tero-Vaurastes-Speech.pdf> (дата обращения 12.10.2023)
30. Arctic Circle Berlin Forum // Article Circle. URL: <https://www.arcticcircle.org/forums/arctic-circle-berlin-forum> (дата обращения 16.10.2023)

**Статья поступила 14 декабря 2023 г.  
Одобрена после рецензирования 15 декабря 2023 г.  
Принята к публикации 18 декабря 2023 г.**

### **Информация об авторах**

*Гехт Антон Борисович* — кандидат исторических наук, доцент кафедры истории и регионоведения. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: [geht.ab@sut.ru](mailto:geht.ab@sut.ru)

*Неровный Артем Викторович* — старший преподаватель кафедры истории и регионоведения. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: [nerovnyi.av@sut.ru](mailto:nerovnyi.av@sut.ru)

*Цверянашвили Иван Алексеевич* — старший преподаватель кафедры истории и регионоведения. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: [cverianashvili.ia@sut.ru](mailto:cverianashvili.ia@sut.ru)

## Arctic Vector of German Foreign Policy

A. Gekht ✉, A. Nerovnyj, I. Tsverianashvili

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Purpose:** *The Arctic region, due to a number of objective reasons, is playing an increasingly important role in the modern system of international relations. Climate changes that improve navigation possibilities, prospects for the extraction of mineral resources, and the exploration of new territories — all these factors place the Arctic region at the center of attention for both Arctic states (Russia, Canada, the United States, Denmark, Norway) and non-Arctic states (Iceland, Sweden, Finland), as well as other major actors in international relations. It is quite logical that Germany, with one of the most powerful economies and significant political influence in the European Union, seeks to actively participate in the international dialogue on the Arctic. The last decade has been decisive for Germany in terms of developing its own Arctic strategy. The article examines the main steps taken by the German government and other state structures in the field of Arctic policy. It highlights the activities of representatives of Germany in the most significant international organizations and forums dealing with Arctic issues. The author analyzes the fundamental documents that reflect the directions of the country's Arctic policy. The expansion of international cooperation in the Arctic opens up opportunities for Germany to use its innovative developments, scientific and technical experience, which the country possesses due to its rich history of polar research. The Arctic region can act as a guarantor of Germany's economic security and geopolitical influence, therefore further involvement of the country in this region can be expected.*

**Keywords:** *Germany, Arctic, foreign policy, Arctic Council, Arctic policy*

### Information about Authors

*Gekht Anton Borisovich – candidate of historical sciences, Associate Professor of the Department of History and Regional Studies. The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications. E-mail: geht.ab@sut.ru*

*Nerovnyj Artem Viktorovich – assistant professor. Assistant professor of the Department of History and Regional Studies. The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications E-mail: nerovnyi.av@sut.ru*

*Tsverianashvili Ivan Alekseevich – assistant professor. Assistant professor Department of History and Regional Studies. The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications. E-mail: cverianashvili.ia@sut.ru*

УДК 621.396.721

## Метод управления мощностью в беспроводной двухуровневой гетерогенной сети

Багаев Е. С.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи:** увеличение структурной сложности беспроводных сетей связи актуализирует вопросы обеспечения их устойчивости к воздействиям дестабилизирующих факторов. Одним из таких факторов являются помехи от устройств, работающих рядом друг с другом. **Целью работы** является разработка метода управления мощностью в системе беспроводной связи. **Предлагается** применять способы управления мощностью для двухуровневой гетерогенной сети. **Используемые методы:** решение задачи управления мощностью основано на применении алгоритмов искусственного интеллекта, в частности на обучении с подкреплением. В качестве параметра, благодаря которому возможно определение дальнейшего действия агента, предложено использовать отношение сигнал/шум. **Новизна:** элементами новизны представленного решения являются использование алгоритмов Q-Learning и учет дестабилизирующих факторов в виде помех от соседних базовых станций и пользовательских устройств. **Результат:** использование представленного решения по управлению мощностью в двухуровневой гетерогенной сети позволяет снизить мощность излучаемого сигнала, при этом происходит увеличение скорости передачи данных от базовой станции к пользовательским устройствам; при этом показано, что при предлагаемом методе управления мощностью с ростом числа базовых станций скорость передачи снижается медленнее, чем при экспоненциальном, квадратичном и жадном алгоритмах.

**Ключевые слова:** сеть связи, искусственный интеллект, машинное обучение, базовые станции, управление мощностью

### Введение

В настоящее время беспроводные сотовые сети обычно развертываются как однородные сети, в которых для всех базовых станций характерны одинаковые уровни мощности излучаемого сигнала, диаграммы направленности антенн и т. д. Также все базовые станции обслуживают примерно одинаковое количество пользовательских терминалов со схожими требованиями к качеству обслуживания.

Процедура планирования сети основана на тщательном выборе будущего местоположения базовых станций. Последующая настройка параметров базовых станций позволяет достичь оптимального покрытия сети сотовой связи даже на обширной территории. Данный способ развертывания сетей влечет за собой возникновение так называемых теневых областей, особенно на границах зоны действия базовой станции, в которых уровень сигнала недостаточно высок.

Гетерогенные сети способны исправить этот недостаток за счет внедрения дополнительных базовых станций. Такая сеть состоит из основных базовых станций, для которых уровень излучаемой мощности обычно равен от 5 до 40 Вт. Также в радиусе действия основной базовой станции располагаются подконтрольные ей пико- и фемтобазовые и ретрансляционные станции, мощность излучения которых не превы-

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Багаев Е. С. Метод управления мощностью в беспроводной двухуровневой гетерогенной сети // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 2. С. 2. EDN: KIZLYW

#### Reference for citation:

Bagaev E. Power Management Method in a Wireless Two-Level Heterogeneous Network // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 2. P. 2. EDN: KIZLYW

шает 2 Вт. Размещение таких малых станций обычно имеет незапланированный характер, основным критерием для выбора мест их расположения является устранение теневых зон в покрытии сети и повышение пропускной способности. Благодаря меньшей мощности передачи и небольшим физическим размерам малые базовые станции могут обеспечивать гибкость при подключении к сети.

В однородной сети каждое пользовательское устройство обслуживается базовой станцией с самым высоким уровнем сигнала, в то время как сигналы, принимаемые от других базовых станций, воспринимаются как помеха. В гетерогенной сети такой принцип может привести к значительному снижению производительности из-за роста количества базовых станций. В двухуровневых гетерогенных сетях координация ресурсов между базовыми станциями, более совершенные методы выбора серверов и более продвинутые алгоритмы управления мощностью могут обеспечить существенный прирост пропускной способности по сравнению с традиционным подходом к развертыванию сети.

### Постановка задачи

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Принятые обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
$MBS$	макробазовая станция
$FBS$	фемтобазовая станция
$SINR$	отношение сигнал/шум
$MDP$	марковский процесс принятия решений
$A_k$	набор действий для базовой станции
$p_{min}$	минимальная мощность передачи
$p_{max}$	максимальная мощность передачи
$X_k$	набор состояний для базовой станции
$a' \in A$	скорость обучения
$R$	вознаграждение для агента
$CQI$	индикатор качества канала
$k, t$	счетчики

### Машинное обучение в современных сетях радиосвязи

Методы машинного обучения успешно применяются во многих областях, таких как компьютерное зрение, обработка естественного языка и т. д., и все чаще используются в системах беспроводной связи из-за преимуществ искусственного интеллекта. Множество исследований демонстрируют, что алгоритмы машинного обучения могут не только обеспечить отличную производительность линий связи, но и снизить вычислительную мощность. Алгоритмы машинного обучения позволяют реализовать распределение мощности в реальном времени. В ряде исследований [1–3] показано, что применение таких алгоритмов ведет к увеличению пропускной способности сети, снижению времени вычислений; предложенные методы оказываются эффективными даже при наличии шума на входе системы.

В данной работе предлагается использовать для управления мощностью один из алгоритмов обучения с подкреплением – Q-Learning. Применение Q-Learning с целью оптимизации ресурсов в системах беспроводной связи основано на том, что все основные составляющие сети могут быть представлены как одна из структурных частей алгоритма обучения с подкреплением. Опишем двухуровневую гетерогенную сеть так, чтобы данное представление позволяло определить взаимодействие всех элементов и давало возможность реализовать управление мощностью базовых станций с помощью Q-Learning.

Основным элементом двухуровневой гетерогенной сети является базовая станция, которая имеет в своем управлении некоторое количество других базовых станций, имеющих значительно меньший радиус обслуживания. Обозначим главную базовую станцию – макробазовую станцию – как MBS (аббр. от англ. Macro Base Station), а подчиняющиеся ей фемтобазовые станции как FBS (аббр. от англ. Femto Base Station). Дальнейшая разработка метода управления мощностью с помощью искусственного интеллекта требует определения основных функциональных узлов сети в качестве элементов схемы обучения с подкреплением. Таким образом, FBS и MBS в нашем случае будут представлены как агент и окружающая среда. Основными функциями агента являются обслуживание подконтрольных ему пользовательских устройств (User Equipment) и, как следствие, обеспечение необходимого уровня мощности излучаемого сигнала. Описанная структура приведена на рисунке 1.

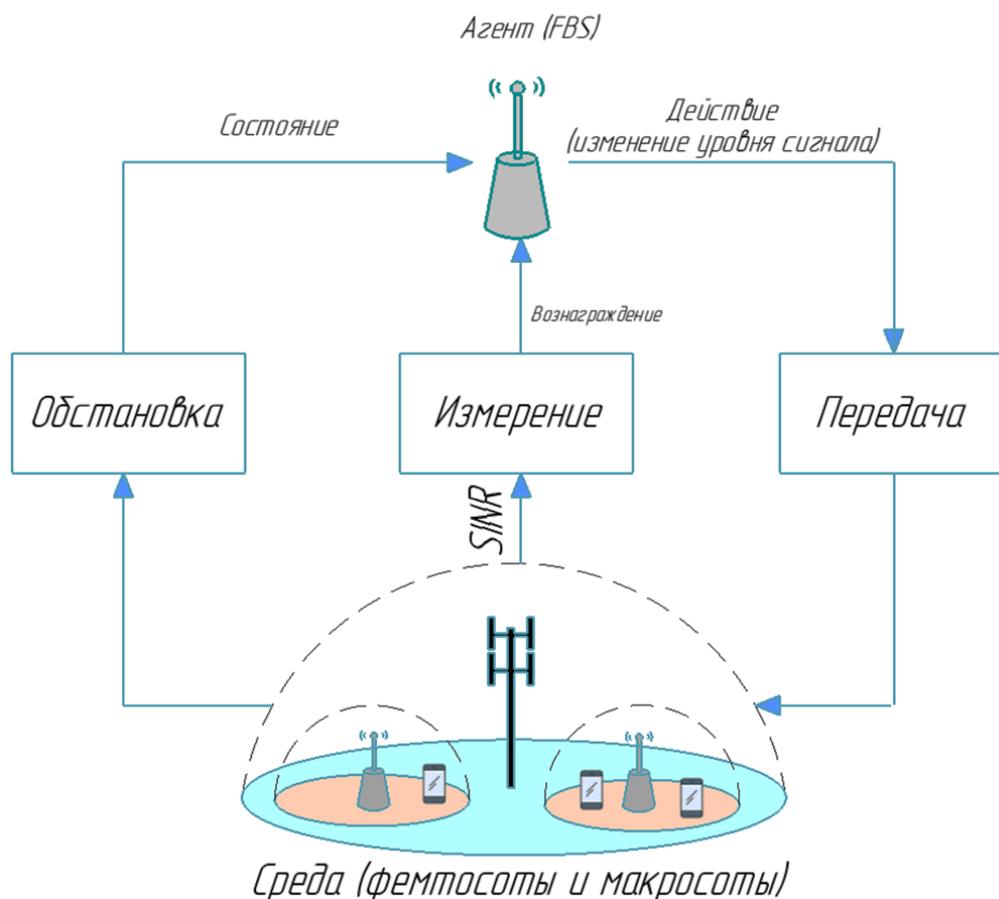


Рис. 1. Двухуровневая гетерогенная сеть с точки зрения Q-Learning

На рисунке также обозначены данные, которые MBS передает агенту, – значения отношения сигнал/шум – SINR (аббр. от англ. Signal Interference + Noise Ratio). Значения SINR необходимы агенту для принятия решения об изменении мощности излучаемого сигнала.

Важно отметить, что все процессы принятия решений об изменении мощности на FBS будут марковскими процессами принятия решений – MDP (аббр. от англ. Markov Decision Process). Это означает, что увеличение или уменьшение мощности на FBS будет основано лишь на настоящем состоянии системы, при этом предыдущие состояния не учитываются.

Для дальнейшей разработки метода управления мощностью представим описанную ранее двухуровневую гетерогенную сеть как многоагентный MDP:

- среда для FBS выглядит как макросота и набор фемтосот;
- агент представлен как FBS и является независимым агентом в MDP;
- цели агента: повышение общей скорости передачи данных, гарантированное обеспечение SINR для пользователей, а также для всех макропользовательских устройств – MUE (аббр. от англ. Macro User Equipment);

- набор действий  $A_k$ :
  - 1) уровень мощности передачи определяется действием FBS;
  - 2) FBS с номером  $k$  устанавливает уровень излучаемого сигнала из набора  $A_k$ , сюда входят значения, включающие в себя минимальную и максимальную мощность передачи  $p_{\min}$  и  $p_{\max}$ , соответственно;
  - 3) FBS не имеет представления об окружающей среде и выбирает свои действия с одинаковой вероятностью во всех случаях;
  - 4) следовательно, для построения множества  $A_k$  выбираются равные размеры шага  $\Delta p$  между  $p_{\min}$  и  $p_{\max}$ ;
- набор состояний  $X_k$ :
  - 1) установившееся состояние напрямую влияет на производительность MUE и FUE, требуется ввести 4 переменные, отображающие текущее состояние сети;
  - 2) переменные  $X_1$  и  $X_2$  — показатели эффективности для MUE и FUE;
  - 3) очень важным нюансом является взаимное расположение FBS относительно MUE и MBS, поскольку позволяет определить суммарную мощность помех в MUE, следовательно, переменная  $X_3$  является индикатором помех для FBS, а переменная  $X_4$  — индикатором помех для MBS;
  - 4) значения  $X_1$  и  $X_2$  могут быть равны 0 либо 1 (0 — для случаев, когда требование по минимальному SINR не удовлетворяется, 1 — требование удовлетворяется); значения для  $X_3$  и  $X_4$  лежат в пределах  $\{0, 1, 2, \dots, N_i\}$  и указывают на расстояния от FBS до MUE и MBS, соответственно.

### Модель управления мощностью для двухуровневой гетерогенной сети

Для решения поставленной задачи используем Q-Learning. Правило обновления Q-Learning при оценке политики для глобальной Q-функции может быть представлено в виде:

$$Q(x^{(t)}, a^{(t)}) \leftarrow Q(x^{(t)}, a^{(t)}) + \alpha^{(t)}(x, a) \left( R^{(t+1)}(x^{(t)}, a^{(t)}) + \beta \underbrace{\max_{a'} Q(x^{(t+1)}, a')}_{(M)} - Q(x^{(t)}, a^{(t)}) \right), \quad (1)$$

где  $a' \in A$ ,  $\alpha^{(t)}(x, a)$  — скорость обучения на временном интервале  $t$ ;  $x^{(t+1)}$  — новое состояние беспроводной сети [4]; многочлен  $M$  — максимальное значение глобальной Q-функции, которая становится известна на состоянии  $x^{(t+1)}$ . После каждой итерации FBS будет получать отложенное вознаграждение  $R^{(t+1)}(x^{(t)}, a^{(t)})$ , и после этого будет происходить обновление глобальной Q-функции.

Применение Q-Learning с постоянной скоростью обучения встречается в работах, посвященных решению задачи оптимизации [5, 6]. Однако согласно [7] при функционировании на конечном числе итераций результативность Q-Learning может быть улучшена путем вычислений со сниженной скоростью обучения. Поэтому в дальнейшем будем использовать такую скорость обучения, которую можно задать как:

$$\alpha^{(t)}(x, a) = \frac{1}{[1 + t(x, a)]'} \quad (2)$$

где  $t(x, a)$  — количество раз, когда устанавливается пара «состояние — действие»  $(x, a)$  на временном интервале  $t$ . Стоит отметить, что при применении данной скорости обучения необходимо будет отслеживать количество срабатываний пары «состояние — действие», что впоследствии приведет к увеличению потребляемой памяти.

Существуют две альтернативы для обучения новых FBS в случае, если они находятся в состоянии присоединения к беспроводной сети: они могут использовать либо независимое, либо совместное

обучение. При независимом обучении каждая FBS пытается максимизировать свою собственную Q-функцию. Другими словами, многочлен  $M$  из выражения 1 может быть представлен как:

$$M = \max_{a'} \sum_{k \in K} Q_k(x_k^{(t+1)}, a'_k) \approx \sum_{k \in K} \max_{a'_k} Q_k(x_k^{(t+1)}, a'_k). \quad (3)$$

При совместном обучении FBS согласованно используют свои Q-функции, и предполагается, что FBS в одном состоянии будут принимать одни и те же решения. Следовательно, многочлен  $M$  аппроксимируется как:

$$M = \max_{a'} \sum_{k \in K} Q_k(x_k^{(t+1)}, a'_k) \approx \max_{a'_k} \sum_{k \in K'} Q_k(x_k^{(t+1)}, a'_k), \quad (4)$$

где  $K'$  – набор FBS, находящихся в одинаковом состоянии  $x_k^{(t+1)}$ . Совместное обучение может привести к росту значения совместного вознаграждения [8]. Однако взаимодействие может привести к одинаковой политике для FBS с одинаковыми состояниями и дополнительным расходам на вычисление, поскольку Q-функции между FBS должны использоваться совместно по каналу обратной связи. Правило единичного обновления для  $k$ -й FBS может быть получено из выражения:

$$Q_k(x_k^{(t)}, a_k^{(t)}) \leftarrow Q_k(x_k^{(t)}, a_k^{(t)}) + \alpha^{(t)} \left( R^{(t+1)}(x_k^{(t)}, a_k^{(t)}) + \beta Q_k(x_k^{(t+1)}, a_k^*) - Q_k(x_k^{(t)}, a_k^{(t)}) \right), \quad (5)$$

где  $R^{(t+1)}(x_k^{(t)}, a_k^{(t)})$  – функция вознаграждения  $k$ -й FBS;  $a_k^*$  – определяется следующим образом для самостоятельного и совместного обучения, соответственно:

$$\arg \max_{a'_k} Q_k(x_k^{(t+1)}, a'_k), \quad (6)$$

$$\arg \max_{a'_k} \sum_{k \in K'} Q_k(x_k^{(t+1)}, a'_k). \quad (7)$$

В нашей работе для представления Q-функции используется табличное представление, в котором строки таблицы относятся к состояниям, а столбцы – к действиям агента. Как правило, для больших наборов состояний нейронные сети более эффективны в случае, если они задаются в качестве функций. Однако здесь рассматривается влияние данных именно в формате переменных.

Процесс обучения для FBS происходит в течение  $L$  кадров. В начале каждого кадра FBS выбирает действие (т. е. ту мощность, с которой будет происходить передача). Затем FBS отправляет пакет данных в фемтопользовательское устройство – FUE (аббр. от англ. Femto User Equipment). Далее FUE возвращает все необходимые измерения, такие как индикатор качества канала – CQI (аббр. от англ. Channel Quality Indicator), чтобы FBS могла оценить SINR в FUE и рассчитать функцию вознаграждения.

### Определение функции вознаграждения

Важным моментом в разработке метода распределения мощности в беспроводных сетях является формирование функции вознаграждения, поскольку именно она влияет на цели FBS. Как правило, количественного подхода к ее разработке не существует. Далее предложен системный подход к получению функции вознаграждения, основанный на изначально поставленной задаче оптимизации. Затем будет проведено сравнение разработанной функции с результатами, полученными ранее и приведенными в [5, 6, 9].

Функция вознаграждения для FBS с номером  $k$  обозначается как  $R_k$ . FBS располагает информацией о минимально требуемом SINR для MUE ( $\Gamma_0$ ) и минимально требуемом SINR для связанного с ним FUE ( $\Gamma_k$ ). Кроме того, после выполнения действия на каждом шаге  $k$ -я FBS имеет доступ к скорости передачи MUE ( $r_0$ ) и скорости передачи FUE ( $r_k$ ). Следовательно,  $R_k$  рассматривается как функция нескольких переменных  $R_k: (r_0, r_k, \Gamma_0, \Gamma_k) \rightarrow \mathbb{R}$ .

Для разработки функции вознаграждения требуется оценить прогресс  $k$ -й FBS в достижении цели оптимизации. Основываясь на входных аргументах для этой функции, определим две методики оценки прогресса: 1)  $(r_0 - \log_2(1 + \Gamma_0))$  для MUE и 2)  $(r_k - \log_2(1 + \Gamma_k))$  для  $k$ -й FBS. Чтобы упростить вычисления, возьмем функцию вознаграждения как полиномиальную функцию определенных оценок прогресса следующим образом:

$$R_k = (r_0 - \log_2(1 + \Gamma_0))^{k_1} + (r_k - \log_2(1 + \Gamma_k))^{k_2} + C, \quad (8)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – целые числа;  $C \in \mathbb{R}$  – константа, называемая смещением функции вознаграждения.

Постоянная смещения  $C$  в функции вознаграждения оказывает два эффекта на алгоритм обучения, первый из которых – влияние смещения на конечное значение состояний. Предположим, что функции вознаграждения  $R_1$  и  $R_2$  задаются как  $R_1 = f(\cdot)$  и  $R_2 = f(\cdot) + C$ ,  $C \in \mathbb{R}$ . Обозначим значения состояния  $x$  для заданной политики  $\pi$ , используя  $R_1$  в качестве  $V_1(x)$  и значение состояния  $x$  для той же политики, как  $R_2$  в качестве  $V_2(x)$ :

$$V_2(x) = \mathbb{E}_\pi \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t (f^{(t+1)}(\cdot) + C) \right] = \mathbb{E}_\pi \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t f^{(t+1)}(\cdot) \right] + C \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t = V_1(x) + \frac{C}{1 - \beta}. \quad (9)$$

Как видно из этого выражения, смещение функции вознаграждения добавляет постоянную величину  $\frac{C}{1-\beta}$  к значению состояний. Однако после сходимости алгоритма все значения состояний становятся одинаковыми.

Второй эффект характеризуется как влияние смещения в самом начале процесса обучения и описывается с помощью функции действия агента, т. е. Q-функции. Предположим, что Q-функция агента инициализирована нулевыми значениями, а функция вознаграждения определена как  $R = f(\cdot) + C$ . Далее представим, что первый переход агента из состояния  $x'$  в состояние  $x''$  происходит за счет выполнения действия  $a$  на временном интервале  $t$ , что означает  $x^{(t)} = x'$  и  $x^{(t+1)} = x''$ . Правило обновления на временном интервале  $t$  задается формулой (5) и записывается как:

$$Q(x', a) \leftarrow Q(x', a) + \alpha^{(t)}(x', a) \left( R(x', a) + \beta \max_{a'} Q(x'', a') - Q(x', a) \right) \leftarrow \alpha^{(t)}(x', a) \left( f(\cdot) + \beta \max_{a'} Q(x'', a') \right) + \underbrace{\alpha^{(t)}(x', a) C}_{(A)}. \quad (10)$$

Согласно приведенному выражению, после первого перехода из состояния  $x'$  в состояние  $x''$  Q-функция для состояния  $x'$  смещается на величину  $(A)$ . Если  $(A > 0)$ , значение состояния  $x'$  увеличивается, а если  $(A < 0)$  – уменьшается. Следовательно, те состояния, в которых агент уже когда-либо находился, будут более предпочтительны для него в начале процесса обучения. Это правило будет работать до тех пор, пока агент не изучит пространство состояний в достаточной мере.

Изменение поведения агента в процессе обучения может быть использовано для того, чтобы подтолкнуть его к желаемым действиям или состояниям. Но, как было сказано ранее, агент заранее ничего не знает об окружающей среде, поэтому выбирается смещение  $C = 0$ .

Функция вознаграждения для  $k$ -й FBS,  $R_k: (r_0, r_k, \Gamma_0, \Gamma_k) \rightarrow \mathbb{R}$ , является непрерывной и дифференцируемой функцией  $\mathbb{R}^2$ :

$$R_k: (r_0, r_k, \Gamma_0, \Gamma_k) = (r_0 - \log_2(1 + \Gamma_0))^{k_1} + (r_k - \log_2(1 + \Gamma_k))^{k_2}, \quad (11)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — целые числа.

Целью FBS является увеличение скорости передачи. С другой стороны, достижение высокой скорости передачи на MUE — это основная задача для FBS, следовательно,  $R_k$  должна обладать следующим свойством:

$$\frac{\partial R_k}{\partial r_i} \geq 0, \quad i = 0, k. \quad (12)$$

Данное свойство означает, что более высокая скорость передачи для FBS или MUE приводит к более высокому вознаграждению. Следовательно, учитывая это, разрабатываемая функция вознаграждения будет способна мотивировать FBS на увеличение  $r_0$  и  $r_k$  настолько, насколько это возможно:

$$R_k = (r_0 - \log_2(1 + \Gamma_0))^{2m-1} + (r_k - \log_2(1 + \Gamma_k))^{2m-1}, \quad (13)$$

где  $m$  — целое число.

Вышеуказанная функция вознаграждения учитывает требования к минимальной скорости передачи данных для FUE и MUE, в то же время поощряя FBS увеличивать скорость передачи данных.

Чтобы внести ясность в нашу функцию вознаграждения, рассмотрим функции вознаграждения, показанные в более ранних работах других авторов. Функция вознаграждения в [5] является квадратичной, в [6] — экспоненциальной, а в [9] — приближенной функцией вознаграждения. Квадратичная функция вознаграждения разработана на основе консервативного подхода. Фактически FBS применяется для выбора действий, которые обеспечивают скорость передачи данных, близкую к минимальному требованию. Таким образом, более высокая или более низкая скорость приводит к той же величине вознаграждения. Квадратичную функцию вознаграждения можно описать следующим образом:

$$\frac{\partial R_k}{\partial r_i} \times (r_i - \log_2(1 + \Gamma_i)) \leq 0, \quad i = 0, k. \quad (14)$$

Ранее указанное свойство подразумевает, что, если скорость передачи на FBS или MUE выше минимального требования, действия, увеличивающие скорость передачи данных, уменьшают вознаграждение. Следовательно, эта функция препятствует скорости передачи данных в беспроводных сетях связи. Скорость передачи данных на FBS для экспоненциальной функции и приближенной функции вознаграждения задаются свойством из (12), а (14) задает скорость передачи на MUE для этих же функций. Другими словами, они удовлетворяют условию:

$$\frac{\partial R_k}{\partial r_0} \times (r_0 - \log_2(1 + \Gamma_0)) \leq 0, \quad \frac{\partial R_k}{\partial r_k} \geq 0. \quad (15)$$

По мере увеличения плотности расположения FBS, вышеуказанные функции приводят к возрастанию мощности передачи для достижения более высокой индивидуальной скорости для FUE, в то же время создавая более высокие помехи для MUE и других соседних FUE. Фактически, поскольку увеличение коэффициента FUE вознаграждается, выполнение действий, приводящих к росту коэффициента MUE, уменьшает вознаграждение. Однако у FBS должна быть возможность уменьшить мощность своей передачи, чтобы увеличить скорость MUE. Такая особенность работы FBS важна, поскольку это приводит к тому, что FBS будет создавать меньше помех для соседних фемтосот. Поэтому разрабатываемая модель предоставляет равные возможности для увеличения скорости передачи на MUE или FUE.

Значение функций вознаграждения для разных FBS различно. На рисунке 2 приведены графики для указанных функций. Важными моментами, на которые стоит обратить внимание при рассмотрении этих графиков, являются максимальные значения функций вознаграждения, изменения функций вознаграждения в зависимости от минимальных требований и в зависимости от  $r_k$  и  $r_0$ .

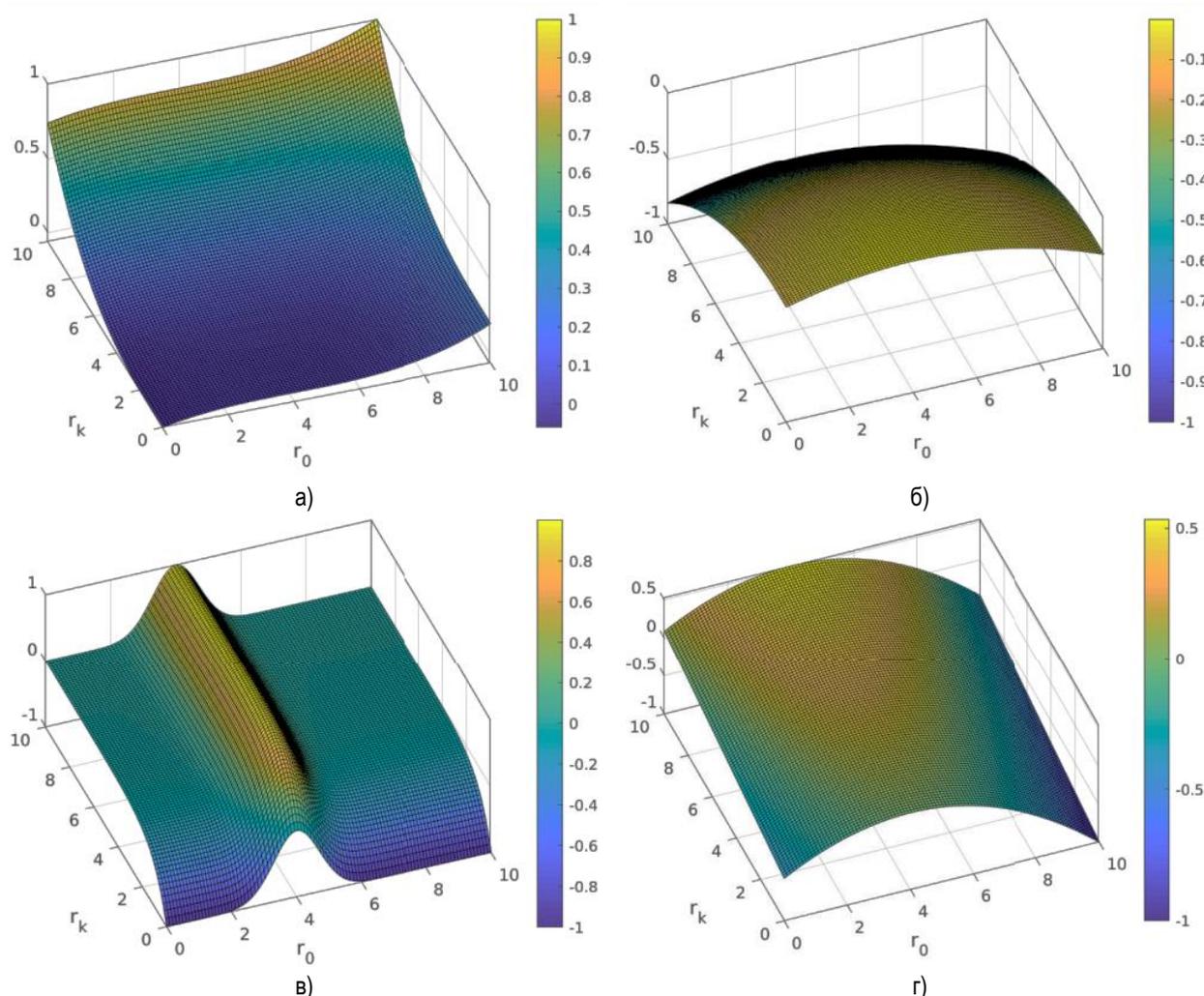


Рис. 2. Функции вознаграждения: а) предложенная в работе функция вознаграждения для  $m = 2$ ; б) квадратичная функция вознаграждения при максимуме в точке (4; 0,5); в) экспоненциальная функция вознаграждения; г) приближенная функция вознаграждения

Предлагаемая в данной работе функция вознаграждения, изображенная на рисунке 2а, показывает, что FBS способна выбирать уровень мощности излучения, при котором достигается увеличение как  $r_k$ , так и  $r_0$ . В то же время другие функции вознаграждения достигают своего максимума в точках, в которых переменные  $r_k$  и  $r_0$  не достигают максимального значения на заданном интервале.

### Применение модели распределения мощности для оптимизации двухуровневой гетерогенной сети

Для симуляции модели были заданы следующие начальные данные:

- радиус зоны покрытия макросоты равен 350 м;
- макросота назначает отдельный диапазон частот для каждого MUE.

Радиус действия каждой FBS ограничен малой площадкой с размерами  $10 \times 10$  м. В центре находится MUE с поддержкой FUE на расстоянии до 5 м. Доступ к FBS для MUE закрыт — это значит, что MUE не может подключиться к FBS, но при этом FBS является источником помехового сигнала для MUE, так как они работают на одной частоте.

Пусть MUE и все FBS работают на одних и тех же поднесущих, что позволит учесть наихудший сценарий работы системы связи. Следующим шагом станет определение начальных данных. Пусть FBS и MBS работают на частоте  $f = 2,0$  ГГц. Мощность излучения MBS составляет 33 дБм, а FBS выбирает свою мощность излучения из диапазона от 5 до 15 дБм с шагом в 1 дБм. Чтобы смоделировать потери на распространение сигнала, используем модель городскую модель, предложенную в [10]. Параметры на затухание сигнала приведены в таблице 2, где  $R$  – расстояние между приемником и передатчиком, в метрах;  $L_{ow}$  – потери на затухание в стенах (20 дБ) [10];  $d_{2D,indoor}$  – двухмерное расстояние. В нашем случае полагаем, что  $d_{2D,indoor} = R$ .

Таблица 2. Модель распространения сигнала в городской среде

Направление канала связи	Потери на распространение сигнала, дБ
от MBS к MUE	$15,3 + 37,6 \log_{10} R$
от MBS к FUE	$15,3 + 37,6 \log_{10} R + L_{ow}$
от FBS к FUE	$56,76 + 20 \log_{10} R + 0,7d_{2D,indoor}$
от FBS к FUE	$\max(15,3 + 37,6 \log_{10} R + 38,46 + 20 \log_{10} R) + 18,3 + 0,7d_{2D,indoor}$

Минимальные требования к SINR для MUE и FUE определяются на основе необходимой скорости передачи данных для поддержки обслуживаемого пользователя. В дальнейших расчетах предполагается, что минимальная требуемая скорость передачи для обеспечения качества обслуживания – QoS (аббр. от англ. Quality of Service) на MUE равна:

$$\log_2(1 + \Gamma_0) = 4 \text{ б/с/Гц.} \quad (16)$$

Минимальная скорость для FUE:

$$0,5 \log_2(1 + \Gamma_k) = 4 \text{ б/с/Гц.} \quad (17)$$

Для выполнения процесса Q-Learning требуется минимальное количество кадров  $L$ , которое вычисляется исходя из достижения показателя оптимальности в 90 %, с вероятностью не менее 0,9, т. е.  $\delta = 0,1$ . Все перечисленные исходные данные для симуляции приведены в таблице 3. Значения для параметров Q-Learning выбираются в соответствии с [11].

Таблица 3. Модель распространения сигнала в городской среде

Параметр	Значение
Длительность кадра	2 мс
Тепловой шум	-174 дБм/
Модель трафика	Полный буфер
Радиусы колец $d'_1, d'_2, d'_3$	50; 100; 400 м
Радиусы колец $d_1, d_2, d_3$	17,5; 22,5; 45 м
Количество итераций $L$	$T \times  X   A_k $
Обучающий параметр $\beta$	0,9
Вероятность обучения (исследовательская вероятность)	10 %
$p_{\min}$	5 дБм
$p_{\min}$	15 дБм
$\Delta p$	1 дБм

Сначала симуляция проходит для одной фемтосоты. После первого приближения в сеть добавляется новая FBS, которая также начинает выполнять алгоритм, в то время как первая FBS уже завершила процесс обучения и лишь принимает решение о выборе уровня излучаемой мощности. После того, как новая FBS завершила процесс обучения, в сеть добавляется еще одна FBS и т. д. Результаты моделирования в этой работе представлены в зависимости от количества FBS: от 1 до 10.

### Анализ результатов симуляции

Продемонстрируем результаты симуляции для распределения мощности, определив сначала два набора состояний:  $\chi_1 = \{X_1, X_3, X_4\}$  и  $\chi_2 = \{X_2, X_3, X_4\}$ . В обоих случаях FBS будут знать о своем местоположении относительно MUE и MBS благодаря наличию  $X_3, X_4$  в наборах. Набор состояний  $\chi_1$  передает информацию о состоянии FUE в FBS, а набор  $\chi_2$  — о состоянии MUE в FBS.

Для того чтобы оценить разницу между независимым и совместным обучением, а также разницу между обучением при разных наборах состояний, используем четыре различные конфигурации обучения: независимое и совместное обучение с применением обоих наборов состояний  $(IL + \chi_1)$ ,  $(IL + \chi_2)$  и  $(CL + \chi_1)$ ,  $(CL + \chi_2)$ . Результаты представлены на рисунке 3 и сравниваются с так называемым жадным алгоритмом (Greedy algorithm), в котором каждая FBS выбирает максимум излучаемой мощности.

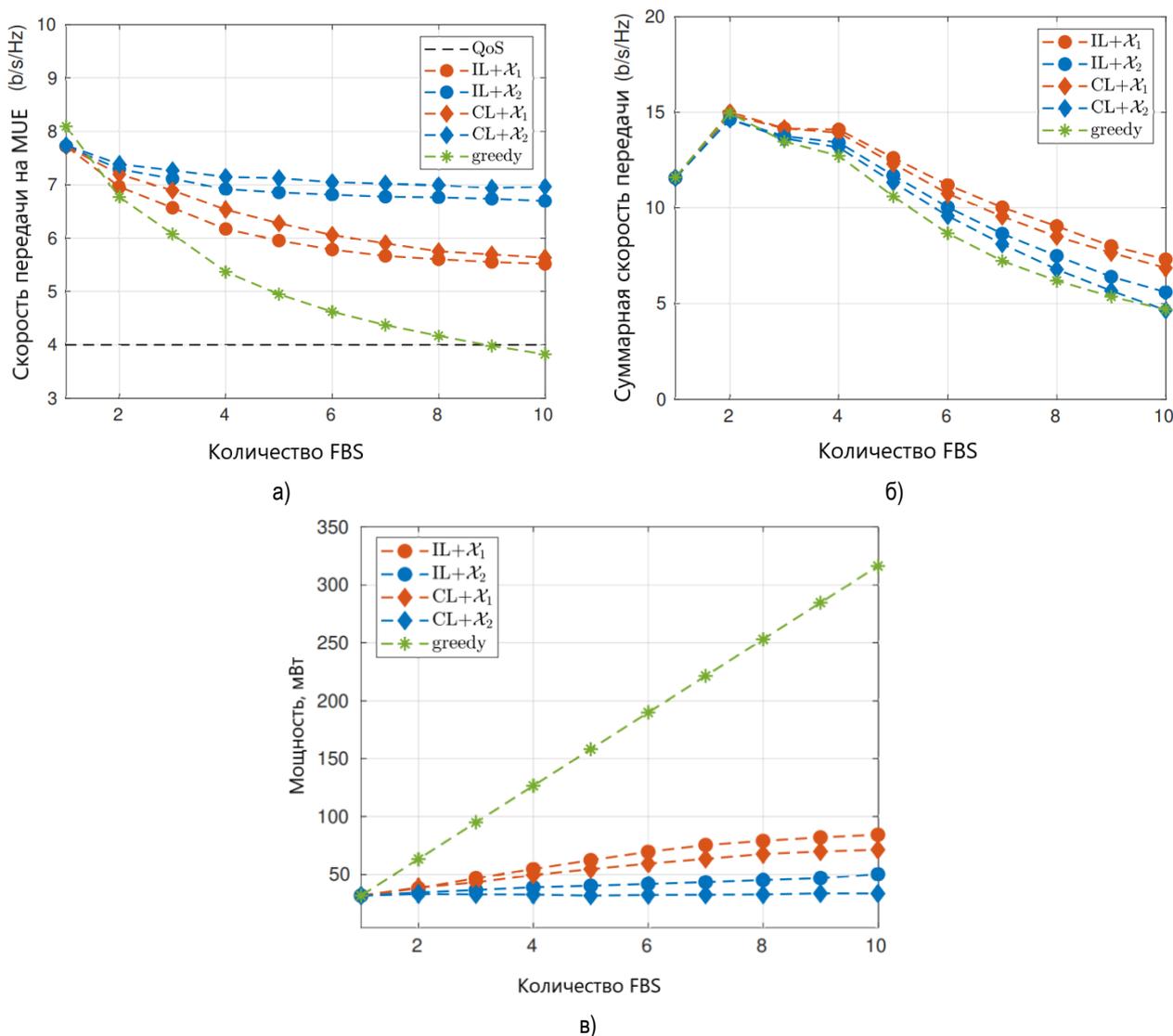


Рис. 3. Результаты симуляции при использовании независимого и совместного обучения с применением двух наборов состояний: а) скорость передачи данных на MUE; б) суммарная скорость передачи данных для FUE; в) суммарная скорость передачи данных для FBS

Из рисунка 3а видно, что при жадном алгоритме каждая FBS использует максимум доступной мощности, вследствие чего помехи для MUE максимальны, а скорость передачи минимальна. При этом на FUE не достигается максимальная скорость передачи, что также вызвано высоким уровнем помех.

Набор состояний  $\chi_2$  предоставляет MUE знание о QoS для подчиненных FBS. Однако, как мы видим на рисунке 3а, результаты  $(IL + \chi_2)$  лучше, чем при  $(IL + \chi_1)$ . Это утверждение справедливо и для  $CL$ . Также мы можем наблюдать эту взаимосвязь на графике, представляющем суммарную скорость передачи для FUE (рисунок 3б).

Из результатов симуляции можно сделать вывод, что  $IL$  и  $CL$  имеют отличительные особенности, а именно: при  $IL$  достигается более высокая скорость передачи данных для FBS и более низкая скорость передачи данных для MUE, в то время как  $CL$  может поддерживать более высокую скорость передачи для MUE за счет низкой общей скорости для FBS.

Для максимизации суммарной скорости передачи данных для FUE воспользуемся комбинацией независимого обучения и набора состояний  $\chi_1$  в качестве конфигурации для последующего обучения. На рисунке 4 представлены результаты расчета скорости передачи данных для MUE, суммарная скорость передачи для всех FUE, а также общая мощность излучения для FBS.

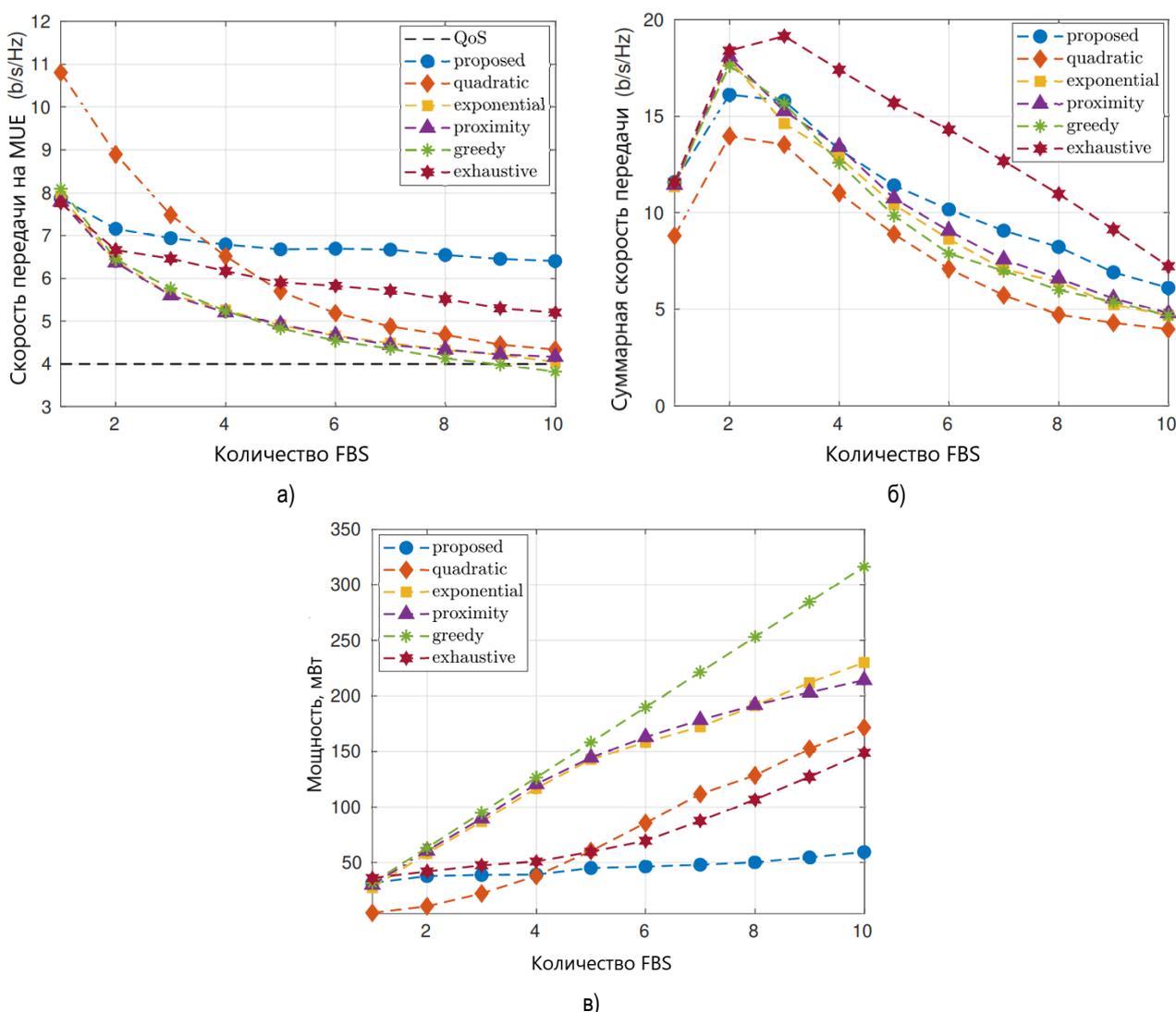


Рис. 4. Результаты симуляции для различных типов алгоритмов: а) скорость передачи данных на MUE; б) суммарная скорость передачи данных для FUE; в) суммарная скорость передачи данных для FBS

Также результаты моделирования сравниваются с жадным алгоритмом и полным перебором значений. Реализация алгоритма с полным перебором значений предлагает нам максимально возмож-

ную скорость передачи данных для всех узлов в сети. Графики для моделирования квадратичной, экспоненциальной и приближенной функций вознаграждения имеют быстро снижающийся характер для скорости передачи данных для MUE. В то же время конечные графики функции вознаграждения для предлагаемой в данной работе модели имеют более плавный характер — с увеличением количества FBS в сети скорость передачи данных снижается минимум в 1,5 раза медленнее, чем при остальных функциях вознаграждения, это видно на рисунке 4а. Там же показано, что скорость передачи данных для предлагаемой модели в 1,2 раза выше, чем у ближайшей по значению скорости передачи модели. Рисунок 4в показывает, что предлагаемая функция вознаграждения уменьшает суммарную мощность на FBS, что, в свою очередь, может привести к снижению уровня помех на FUE. В сравнении с функцией вознаграждения, полученной методом перебора, выигрыш предлагаемой функции очевиден. По рисунку 4в видно, что введенная функция вознаграждения предлагает снижение мощности на 50 мВт для восьми FBS, работающих в сети. Однако из рисунков 4а и 4б видно, что при последующем увеличении мощности возможно снижение скорости передачи данных на MUE без преодоления минимального требуемого значения.

### Выводы

В работе представлен метод управления мощностью для двухуровневой гетерогенной сети. Предложенный метод использует алгоритмы машинного обучения, что выделяет его на фоне операций по планированию беспроводных сетей мобильной связи. В частности, используется обучение с подкреплением, что позволяет добиться увеличения скорости передачи на базовой станции по сравнению с другими функциями. Также видно, что при увеличении числа базовых станций в сети скорость передачи данных между станциями и пользовательскими устройствами остается выше, чем при применении алгоритмов оптимизации, основанных только на планировании беспроводной сети.

В дальнейшем планируется развитие представленного метода в направлении учета не только отношения SINR и CQI сети связи, но и других параметров, учет которых позволил бы снизить уровень интерференции на уровне MBS.

### Литература

1. Ye H., Li G. Y., Juang B.-H. Power of Deep Learning for Channel Estimation and Signal Detection in OFDM Systems // *IEEE Wireless Communication Letters*. 2018. Vol. 7. Iss. 1. PP. 114–117.
2. Sun H., Chen X., Shi Q., Hog M., Fu X., et al. Learning to Optimize: Training Deep Neural Networks for Wireless Resource Management // *Proceedings of the IEEE 18<sup>th</sup> International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. 2017. PP. 1–6. DOI: 10.1109/SPAWC.2017.8227766
3. Matthiesen B., Zappone A., Besser K.-L., Jorswieck E. A., Debbah M. A Globally Optimal Energy-Efficient Power Control Framework and its Efficient Implementation in Wireless Interference Networks // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018. Vol. 68. DOI: 10.1109/TSP.2020.3000328
4. Watkins C. J. C. H., Dayan P. Q-Learning // *Machine Learning*. 1992. Vol. 8. Iss. 3. PP. 279–292.
5. Galindo-Serrano A., Giupponi L. Distributed Q-Learning for Aggregated Interference Control in Cognitive Radio Networks // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2010. Vol. 59. Iss. 4. PP. 1823–1834. DOI: 10.1109/TVT.2010.2043124
6. Saad H., Mohamed A., ElBatt T. Distributed Cooperative Q-Learning for Power Allocation in Cognitive Femtocell Networks // *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*. 2012. PP. 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2012.6399230
7. Guestrin C., Lagoudakis M. G., Parr R. Coordinated Reinforcement Learning // *Proceedings of The Nineteenth International Conference on Machine Learning*. 2002. PP. 227–234.
8. Busoniu L., Babuska R., Schutter B. D. A Comprehensive Survey of Multiagent Reinforcement Learning // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C (Applications and Reviews)*. 2008. Vol. 38. Iss. 2. PP. 156–172. DOI: 10.1109/TSMCC.2007.913919

9. Tefft J. R., Kirsch N. J. A Proximity-Based Q-Learning Reward Function for Femtocell Networks // Proceedings of the 78<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference. 2013. PP. 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2013.6692057
10. Kim J., Lee D., Sung W. Interference Coordination of Heterogeneous LTE Systems Using Remote Radio Heads // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2013. Vol. 90. DOI: 10.1186/1687-6180-2013-90
11. Zarakovitis C. C., Ni Q., Skordoulis D. E., Hadjinicolaou M. G. Power-Efficient Cross-Layer Design for OFDMA Systems with Heterogeneous QoS, Imperfect CSI, and Outage Considerations // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2012. Vol. 61. Iss. 2. PP. 781–798. DOI: 10.1109/TVT.2011.2179817

**Статья поступила 5 декабря 2023 г.**  
**Одобрена после рецензирования 18 декабря 2023 г.**  
**Принята к публикации 19 декабря 2023 г.**

#### **Информация об авторе**

*Багаев Егор Сергеевич* — аспирант кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.  
E-mail: bagaev13@yandex.ru

## Power Management Method in a Wireless Two-Level Heterogeneous Network

**E. Bagaev**

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Purpose.** *The increase in the structural complexity of wireless communication networks actualizes the issues of ensuring their resistance to the effects of destabilizing factors. One of these factors is interference from devices working next to each other. The aim of the work is to develop a method of power management in a wireless communication system. It is proposed to apply power management methods for a two-level heterogeneous network with a goal.* **Methods.** *The solution of the power management problem is based on the use of artificial intelligence algorithms, in particular, reinforcement learning. As a parameter, thanks to which it is possible to determine the further action of the agent, it is proposed to use the signal-to-noise ratio.* **Novelty.** *The novelty elements of the presented solution are the use of Q-Learning algorithms and consideration of destabilizing factors in the form of interference from neighboring base stations and user devices. Result. Using the presented solution for the power management method in a two-level heterogeneous network allows you to reduce the power of the emitted signal, while increasing the data transfer rate from the base station to user devices. At the same time, it is shown that with the proposed power management method, with an increase in the number of base stations, the transmission rate decreases more slowly than with exponential, quadratic and greedy algorithms.*

**Key words:** *communication network, artificial intelligence, machine learning, base stations, power management*

### Information about Author

*Bagaev Egor* – is a postgraduate student of the Department of Radio Communications and Broadcasting (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications).  
E-mail: [bagaev13@yandex.ru](mailto:bagaev13@yandex.ru)

УДК 004.512

## Алгоритм оценки согласованности информационно-функциональных элементов графических пользовательских интерфейсов

Вострых А. В.

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России,  
Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация

**Постановка задачи:** в настоящее время для выполнения пользователями различных должностных обязанностей существует широкий спектр программного обеспечения, характеризующегося помимо функциональных возможностей еще и когнитивно-эргономическими характеристиками, от которых зависят такие показатели пользователей, как скорость работы, удовлетворенность, вероятность совершения ошибок и т. д. С целью выбора наиболее эффективных программных продуктов из множества существующих аналогов требуется инструмент, основанный на строгом математическом аппарате, что позволит избежать субъективности результатов оценки. **Целью работы** является разработка научно-методического средства в виде алгоритма, позволяющего проводить оценку программных продуктов для выбора наиболее эффективных. **Используемые методы:** для достижения обозначенной цели был проведен сравнительный анализ широкого спектра подходов из таких областей науки, как визуальная эстетика; человеко-компьютерное взаимодействие, гештальт-психология, нейроэстетика, перцептивная психология и эргономика, что позволило выделить ряд подходов, способных решить задачи настоящего исследования и синтезировать нужный алгоритм. **Новизна:** по сравнению с дифференциальными подходами к оценке программного обеспечения разработанный алгоритм основан на агрегировании ряда выделенных показателей оценки согласованности информационно-функциональных элементов графических пользовательских интерфейсов. **Результат:** разработан алгоритм оценки согласованности информационно-функциональных элементов графических пользовательских интерфейсов, позволяющий проводить оценку и сравнение программных продуктов по данному критерию.

**Ключевые слова:** графический пользовательский интерфейс, алгоритм, согласованность, информационно-функциональный элемент, оценка

### Актуальность

В современном мире активно применяются различные интеллектуальные технологии для проектирования программного обеспечения (ПО) и его графических пользовательских интерфейсов (ГПИ). Несмотря на открывшиеся технические возможности оптимизации параметров ГПИ для определенных пользователей с учетом совокупности их конкретных характеристик, производители ПО в большинстве случаев используют традиционные парадигмы, отличающиеся субъективностью и низкой эффективностью, что не позволяет добиться соответствия параметров ГПИ требованиям и потребностям конкретных категорий пользователей. Вместе с этим снижаются как основные показатели целевой аудитории, использующей ПО (скорость работы, количество ошибок, субъективная удовлетворенность, скорость обучения и т. д.), так и рыночная привлекательность, характеризующаяся объемом продаж [1–2].

#### Библиографическая ссылка на статью:

Вострых А. В. Алгоритм оценки согласованности информационно-функциональных элементов графических пользовательских интерфейсов // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 2. С. 3. EDN: UWWBKD

#### Reference for citation:

Vostrykh A. Algorithm for Evaluating the Consistency of Information and Functional Elements of Graphical User Interfaces // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 2. P. 3. EDN: UWWBKD

## Постановка задачи

Использование результатов исследований из таких областей науки, как визуальная эстетика, человеко-компьютерное взаимодействие, гештальт-психология, нейроэстетика, перцептивная психология и эргономика, позволило по-новому взглянуть как на процесс проектирования ГПИ, так и на методы оценки их эффективности [3–6]. Автором настоящей статьи ранее был агрегирован широкий спектр данных из упомянутых выше областей, что позволило прийти к идее разработать комплекс алгоритмов, оценивающих эффективность визуальной составляющей ГПИ [7]. В данный комплекс вошел алгоритм оценки согласованности информационно-функциональных элементов ГПИ, описанный в настоящей статье. Данный алгоритм отвечает за оценку эффективности восприятия информационно-функциональных элементов (ИФЭ) ГПИ пользователями целевой аудитории. С его помощью становится возможным, например, проверить сочетаемость ИФЭ между собой, их узнаваемость пользователями, степень усилий операторов по поиску необходимых ИФЭ, интуитивность понимания ИФЭ и т. д. В процессе выполнения алгоритма исследователь получит числовые оценки по трем составляющим алгоритма (показателям эффективности): наглядность, понятность, узнаваемость.

- наглядность – степень усилий пользователей для поиска ИФЭ ГПИ;
- понятность – степень усилий пользователей по интерпретации общей логической концепции ГПИ;
- узнаваемость – степень узнаваемости пользователями ИФЭ интерфейсов и общей интуитивности интерфейсов.

## Методы исследования

Для формализованного представления авторских показателей был проведен сравнительный анализ различных подходов, используемых другими исследователями для выполнения схожих задач и функций:

- метрики: селективности и целостности Ю. Г. Емельяновой [8]; структурности А. С. Звенигородского [9]; ценности данных А. А. Харкевича [10]; чрезмерности К. Парка [11]; визуальной простоты К. Стикела [12]; информативности и выразительности Б. С. Горячкина [13]; предсказуемости В. М. Алефиренко [14]; интерпретируемости Л. А. Кузнецова [15]; краткости К. Шеннона [16]; наглядности В. В. Диковицкого [17];

- методы: определения визуальной простоты Т. Комбера и Д. Мэлтби [8]; определения объема перерабатываемой информации Р. Хартли [18]; декомпозиции ментальных операторов И. Н. Оксанича [19]; оценки объема обработанных данных Л. В. Фаткина [20]; сложности поиска Ю. Г. Емельяновой [8];

- законы: Я. Нильсена об опыте интернет-пользователей [21]; П. Фиттса о сложности задачи выбора цели [22]; У. Хика о зависимости времени реакции человека от числа имеющихся стимулов [23]; Д. Миллера об объеме рабочей памяти человека [24]; Д. Постеля о работоспособности и устойчивости программных продуктов [25]; сохранения сложности Л. Теслера [26]; энтропии К. Шеннона [16];

- модель измерения сложности LOC-СС И. Альсмади [27].

Возможность применения существующих подходов к оценке выявленных показателей эффективности ГПИ представлена в таблице 1.

Таблица 1. Возможность применения существующих подходов к оценке авторских показателей согласованности ИФЭ интерфейсов

№ п/п	Наименование подхода	Показатели эффективности ГПИ		
		Наглядность	Понятность	Узнаваемость
1	Чрезмерность (К. Парк)	–	+	–
2	Объем перерабатываемой информации (Р. Хартли)	+	–	–
3	Информативность (Б. С. Горячкин)	–	+	–
4	Сложность поиска (Ю. Г. Емельянова)	+	–	–
5	Наглядность (В. В. Диковицкий)	–	+	–
6	Визуальная простота (К. Стикел)	+	–	–
7	Лаконичность (К. Шеннон)	–	–	+
8	Предсказуемость (В. М. Алефиренко)	–	–	+

В результате проведенного анализа было установлено, что *показатели* представляется возможным вычислить с помощью следующих *подходов*:

– *наглядность* – объем перерабатываемой информации Р. Хартли; *сложность поиска* Ю. Г. Емельяновой и *визуальная простота* К. Стикела; из трех подходов автором настоящей статьи выбрана *сложность поиска*, поскольку объем перерабатываемой информации имеет в своем составе экспертные переменные, которые снижают точность полученных результатов, а *визуальная простота* не обладает гибкостью и может использоваться ограниченно;

– *понятность* – *избыточность* К. С. Парка; *информативность* Б. С. Горячкина и *наглядность* В. В. Диковицкого; из трех подходов нами выбрана *избыточность*, в отличие от конкурентов обладающая свойством универсальности и простоты вычисления, также в этом подходе отсутствуют какие-либо субъективные и случайные величины;

– *узнаваемость* – *лаконичность* К. Шеннона и *предсказуемость* В. М. Алефиренко; для применения к вычислению показателя автором выбран подход *предсказуемость*, так как он в отличие от своего конкурента основан на эргономических показателях пользователей и физических возможностях человека.

Таким образом, в состав алгоритма оценки согласованности ИФЭ ГПИ войдут три агрегированных подхода, способные в математическом виде представить авторские показатели.

После выбора методов оценки перейдем к их формализованному описанию.

Ежедневная работа рядовых пользователей чаще всего связана с постоянным поиском на экране монитора необходимых ИФЭ с заданными признаками; исходя из этого эффективность ГПИ может быть оценена средним временем информационного поиска (показатель «наглядность»). Для этого целесообразно использовать формулу Ю. Г. Емельяновой [8]:

$$T_s = \mu * t_f, \quad (1)$$

где  $t_f$  – длительность зрительной фиксации;  $\mu$  – математическое ожидание числа зрительных фиксаций, необходимых для нахождения ИФЭ с заданными признаками.

Величина  $\mu$  вычисляется с помощью следующей формулы:

$$\mu = (N/A) + 1 / (M + 1), \quad (2)$$

где  $N$  – количество ИФЭ;  $M$  – количество ИФЭ, обладающих заданным для поиска признаком;  $A$  – объем визуальной информации, находящейся в области ясного видения (количество ИФЭ). Под понятием «область ясного видения» понимается зона на экране, в пределах которой пользователи в силу психофизиологических возможностей однозначно воспринимают и распознают графические элементы и их составляющие, такие как текст, иконки и т. д.

Таким образом, формула (1) примет следующий вид:

$$T_s = \mu * t_f = ((N/A) + 1) / (M + 1) * t_f. \quad (3)$$

Как было описано выше, показатель «понятность» оценивает степень усилий пользователей по интерпретации общей логической концепции ГПИ. Данный показатель можно рассчитать с помощью формулы К. С. Парка [11]:

$$r = 1 - H_p / H_{\max}, \quad (4)$$

где  $H_p$  – количество информации, которую должен освоить пользователь;  $H_{\max}$  – максимальная энтропия.

Степень узнаваемости пользователями ИФЭ интерфейсов (показатель «узнаваемость») представляется возможным рассчитать с помощью формулы В. М. Алефиренко [14], по которой вычисляется сложность поиска пользователями на экране ИФЭ с заданными признаками, такими как особая форма, цвет или функциональность:

$$T_{is} = \sum_{i=1}^n (t_{gv} + t_{fi}), \quad (5)$$

где  $t_{gv}$  – время перемещения  $i$ -го взора;  $t_{fi}$  – время  $i$ -й фиксации взора;  $n$  – количество шагов поиска (количество фиксаций, затраченных на нахождения нужного объекта).

Приведенное выше формализованное описание показателей позволяет перейти к реализации алгоритма оценки согласованности ИФЭ ГПИ.

### Результаты исследования и их обсуждение

С учетом вышеизложенного алгоритм оценки согласованности ИФЭ ГПИ можно описать пошагово (его схема представлена на рисунке 1).

*Шаг 1.* Подсчет количества информационно-функциональных элементов ГПИ  $N$ .

*Шаг 2.* Выделение количества элементов, обладающих заданным для поиска признаком  $M$ .

*Шаг 3.* Если найдены все элементы, обладающие заданным для поиска признаком  $M$ , то переход к шагу 4, если нет, то возврат на шаг 2.

*Шаг 4.* Вычисление математического ожидания числа зрительных фиксаций  $\mu$ , необходимых для нахождения объекта с заданными признаками по формуле (2).

*Шаг 5.* Вычисление показателя «наглядность»  $T_s$  по формуле (1).

*Шаг 6.* Определение необходимого количества информации, которую должен освоить пользователь  $H_p$ .

*Шаг 7.* Вычисление максимальной энтропии  $H_{max}$ .

*Шаг 8.* Вычисление показателя «понятность»  $r$  по формуле (4).

*Шаг 9.* Определение времени перемещения  $i$ -го взора  $t_{gv}$ .

*Шаг 10.* Определение времени  $i$ -й фиксации взора  $t_{fi}$ .

*Шаг 11.* Подсчет количества шагов поиска  $n$ .

*Шаг 12.* Если проведены все манипуляции с ГПИ, то переход к шагу 13, если нет, то возврат на шаг 9.

*Шаг 13.* Вычисление показателя «узнаваемость»  $T_{is}$  по формуле (5).

*Шаг 14.* Конец алгоритма. Вывод результатов.

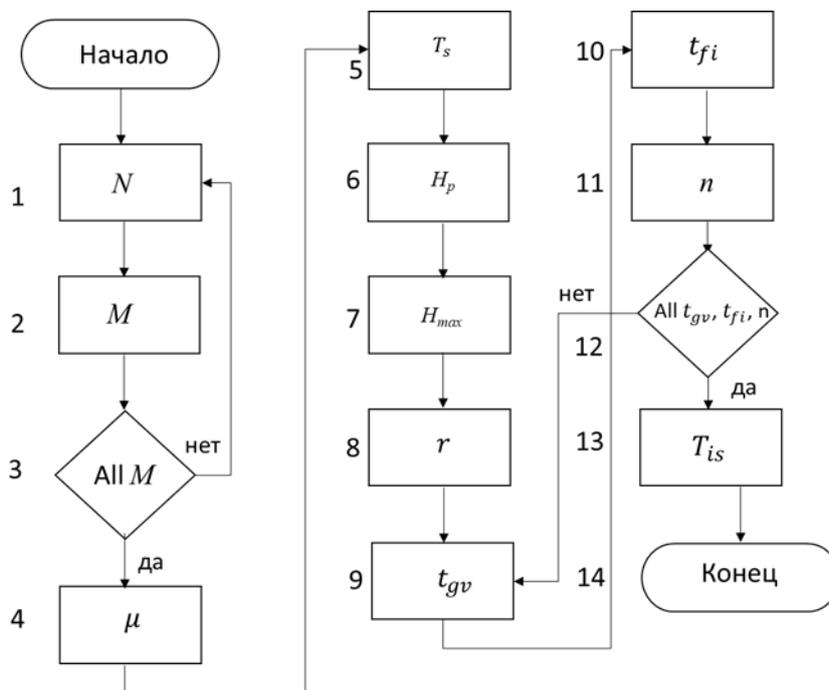


Рис. 1. Схема алгоритма оценки согласованности ИФЭ ГПИ

Таким образом, в результате работы алгоритма становится возможным вычислить следующие показатели: «наглядность», «понятность», «узнаваемость», что позволяет выявить уязвимые места в ПП и их ГПИ, а также проводить аргументированные сравнения ГПИ аналогичных ПП с целью выбора наиболее эффективного.

### Выводы

Представленный в настоящей статье алгоритм оценки согласованности ИФЭ ГПИ решает задачу аргументированного выбора наиболее эффективного ПП из множества аналогов за счет своего формализованного представления и константных величин, основанных на когнитивно-эргономических характеристиках пользователя.

В дальнейшем планируется разработка ПП на основе представленного в настоящей статье алгоритма, что позволит автоматизировать процесс оценки ГПИ, сократив временные и человеческие ресурсы на анализ.

### Литература

1. Алфимцев А. Н., Хаев Ф. И. Гендерные различия в восприятии информации и организации пользовательского интерфейса компьютерных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 6. С. 25–28.
2. Вострых А. В. Анализ информационных систем, используемых в МЧС России для мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: материалы международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 28 октября 2021 г.). СПб.: УГПС МЧС России, 2021. С. 257–260.
3. Norman D. A. Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things. Basic Books, 2005. 272 p.
4. Уэйншенк С. Интуитивный веб-дизайн. СПб.: Эксмо, 2011. 160 с.
5. Головач В. В. Дизайн пользовательского интерфейса v1.2. СПб.: Uibook1, 2014. 141 с. URL: <https://obuchalka.org/2012031664023/dizain-polzovatel'skogo-interfeisa-golovach-v-v-2000.html> (дата обращения 16.12.2023)
6. Баканов А. С., Обознов А. А. Эргономика пользовательского интерфейса: от проектирования к моделированию человеко-компьютерного взаимодействия. М.: Институт психологии РАН, 2011. 176 с.
7. Вострых А. В. Терминологический базис оценки пользовательских интерфейсов: обзор стандартов // Актуальные проблемы инфо-телекоммуникаций в науке и образовании: материалы IX Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 26–27 февраля 2020 г.). СПб.: СПбГУТ, 2020. Т. 2. С. 200–207.
8. Емельянова Ю. Г., Фраленко В. П., Хачумов В. М. Методы комплексного оценивания когнитивных графических образов // Программные системы: теория и приложения. 2018. № 3. С. 49–63. DOI: 10.25209/2079-3316-2018-9-3-49-63
9. Звенигородский А. С., Коломыйцев О. А. Оценка визуальной информации в технических системах // Искусственный интеллект. 2011. № 4. С. 19–23.
10. Харкевич А. А. Проблемы кибернетики. М.: Физматгиз, 1960. 57 с.
11. Park K. S. Human Reliability: Analysis, Prediction, and Prevention of Human Errors. New York, 1987. 340 p.
12. Stickel C., Ebner M., Holzinger A. The XAOS Metric — Understanding Visual Complexity as Measure of Usability // Proceedings of the 6<sup>th</sup> Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering “HCI in Work and Learning, Life and Leisure”. 2010. PP. 278–290.
13. Горячкин Б. С. Оценка выходных экранных форм автоматизированной системы обработки информации и управления // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10. С. 24–27.
14. Алефиренко В. М., Шамгин Ю. В. Инженерная психология. Минск: БГУИР, 2005. 13 с.
15. Кузнецов Л. А., Бугаков Д. А. Разработка меры оценки информационного расстояния между графическими объектами // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 74–79.
16. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. PP. 379–423.

17. Диковицкий В. В. Формализация задачи построения когнитивных пользовательских интерфейсов мультитиппредметных ИР // Информационные технологии. 2013. № 5. С. 90–97.
18. Hartley R. V. L. Transmission of Information // Bell System Technical Journal. 1928. Vol. 7. Iss. 3. PP. 535–563.
19. Оксанич И. Н. Модель декомпозиции ментальных операторов в проблемно ориентированном интерфейсе пользователя и ее экспериментальное исследование // Математические машины и системы. 2010. № 1. С. 105–112.
20. Пономарев И. А. Методы формальной оценки пользовательского интерфейса прикладных программ для ЭВМ // Объединенный научный журнал. 2005. № 3 (131). С. 55–57.
21. Нильсен Я. Дизайн Web-страниц. Анализ удобства и простоты использования 50 узлов сайтов. М.: Вильямс, 2002. 326 с.
22. Fitts P. M. The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling // Journal of Experimental Psychology. 1954. Vol. 47. Iss. 6. PP. 381–391.
23. Hick W. E. On the Rate of Gain of Information // Quarterly Journal of Experimental Psychology. 1952. Vol. 4. Iss. 1. PP. 11–26.
24. Уэйншенк С. 100 новых главных принципов дизайна. Как удержать внимание. СПб.: Питер, 2016. 290 с.
25. Раскин Д. Интерфейс Новые направления в проектировании компьютерных систем. М.: Символ, 2007. 257 с.
26. Купер А., Рейман Р., Кронин Д. Основы проектирования взаимодействия. М.: Символ, 2010. 688 с.
27. Мельникова Р. В. Проектирование пользовательского интерфейса // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 6. № 8 (48). С. 18–20.

**Статья поступила 24 ноября 2023 г.**  
**Одобрена после рецензирования 15 декабря 2023 г.**  
**Принята к публикации 18 декабря 2023 г.**

### Информация об авторе

*Вострых Алексей Владимирович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и информационных технологий. Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России. E-mail: a.vostrykh@list.ru

# Algorithm for Evaluating the Consistency of Information and Functional Elements of Graphical User Interfaces

A. Vostrykh

The Saint-Petersburg University State Fire Service of EMERCOM of Russia,  
St. Petersburg, 196105, Russian Federation

**Purpose:** currently, for the performance of various job responsibilities by users, there is a wide range of software characterized, in addition to functionality, by cognitive and ergonomic characteristics, on which such user indicators as: work speed, satisfaction, probability of making mistakes, etc. depend. In order to select the most effective software products from a variety of existing analogues, a scientific and methodological tool based on a strict mathematical apparatus is needed, which will avoid subjectivity of the evaluation results. The purpose of the work is to develop a scientific and methodological tool in the form of an algorithm that allows evaluating software products to select the most effective ones. **Methods:** to achieve this goal, a comparative analysis of a wide range of approaches from such fields of science as visual aesthetics was carried out; human-computer interaction, gestalt psychology, neuroaesthetics, perceptual psychology and ergonomics, which allowed us to identify a number of approaches capable of solving the tasks of this study. **Novelty:** compared with differential approaches to software evaluation, the developed algorithm is based on the aggregation of a number of selected indicators for evaluating the consistency of information and functional elements of graphical user interfaces. **Results:** an algorithm for evaluating the consistency of information and functional elements of graphical user interfaces has been developed, which allows evaluating and comparing software products in this area.

**Key words:** graphical user interface, algorithm, consistency, information and functional element, evaluation

## Information about Author

Aleksey Vostrykh – candidate of technical sciences, lecturer, department of applied mathematics and information technology. The Saint-Petersburg University State Fire Service of EMERCOM of Russia.  
E-mail: a.vostrykh@list.ru

УДК 004.056.53

## Анализ вероятности проникновения нарушителя на объект через периметр

Герлинг Е. Ю.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи:** Обеспечение информационной безопасности, особенно на объекте связи, является актуальной задачей, и важную роль здесь играет физическая защищенность объекта: невозможность для нарушителя проникнуть на охраняемую территорию незамеченным; периметральная сигнализация необходима для раннего обнаружения попыток проникновения на объект связи или промышленный объект; от ее эффективной и надежной работы зависит информационная безопасность, а также защищенность объекта от террористической атаки, сохранение жизни и здоровья людей и другие важные аспекты. **Цель работы** – проанализировать и сравнить вероятности проникновения нарушителя через ограждение при использовании на объекте извещателей периметральной сигнализации, основанных на различных принципах действия, а также комбинации данных извещателей. **Результат:** Проанализирована эффективность периметральной сигнализации при применении разных извещателей, а также при их комбинации. Кроме того, приведены расчеты вероятности преодоления нарушителем ограждения для рассмотренных случаев. Разобраны принципы обнаружения нарушителя извещателями периметральной сигнализации; различные принципы их действия позволяют обнаружить попытки проникновения разными способами, поэтому для повышения защищенности объекта рекомендуется комбинировать извещатели периметральной сигнализации. **Практическая значимость:** результаты исследования могут использоваться для выбора и комбинации извещателей периметральной сигнализации, позволяют повысить вероятность раннего обнаружения проникновения нарушителя на объект, что увеличивает его защищенность.

**Ключевые слова:** периметральная сигнализация, ограждение, вероятность проникновения нарушителя, извещатель, объект связи

### Введение

На информационную безопасность объекта связи влияет много факторов [1]. Говоря о защите информации, как правило, подразумевают непосредственную защиту данных, которые хранятся и передаются в цифровом виде. Предполагается защищать каналы от прослушивания, серверы от вторжения по цифровым каналам [2, 3]. Однако информационная безопасность начинается с физической защиты объекта связи или промышленного объекта, и прежде всего – с предотвращения проникновения нарушителя на объект, в серверную или к помещениям с кабельными линиями [4].

Информационная безопасность особенно актуальна на крупных промышленных объектах, где локальные сети являются неотъемлемой частью управления сложными технологическими процессами, а также непосредственно на объектах связи. В этом случае проникновение нарушителя в серверную или аппаратную (помещение, где расположено оборудование, контролирующее технологические про-

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Герлинг Е. Ю. Анализ вероятности проникновения нарушителя на объект через периметр // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 2. С. 4. EDN: JZIKZD

#### Reference for citation:

Gerling E. Analysis of the Probability of Intruder Penetration into the Facility through the Perimeter // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 2. P. 4. EDN: JZIKZD

цессы) может привести к незапланированной остановке производства, к глобальной экологической катастрофе, к обрыву каналов связи и к другим негативным последствиям [5].

Важной составляющей как защиты информации, так и безопасности сотрудников и посетителей является физическая безопасность объекта, которая обеспечивается взаимодействием нескольких объектовых систем [6]. Список необходимых для защиты систем зависит от особенностей объекта, но, как правило, включает в себя периметральную сигнализацию, охранную сигнализацию, систему контроля и управления доступом и систему охранного видеонаблюдения [7]. Правильно спроектированные и установленные системы физической безопасности объекта позволяют свести вероятность незамеченного проникновения нарушителя на объект почти к нулю, тем самым способствуя обеспечению информационной безопасности [8].

Периметральная сигнализация, охранная сигнализация, видеонаблюдение, система контроля и управления доступом — это системы физической безопасности объекта связи или промышленного объекта (далее — объекта), которые необходимы для своевременного обнаружения попыток проникновения на объект. При попытках проникнуть на объект нарушитель встретится, прежде всего, с периметральной сигнализацией, которая будет подробно рассмотрена в данной работе.

### **Защита периметра объекта связи**

Основной задачей периметральной сигнализации является обнаружение попыток проникновения злоумышленника на объект (сигнал тревоги) и информирование о данном инциденте соответствующих служб. При защите объекта важно минимизировать ошибки ложной тревоги, когда периметральная сигнализация дает сигнал тревоги при отсутствии попытки проникновения, а также минимизировать ошибки пропуска нарушителя. Последнее требование является особо актуальным на сегодняшний день, поскольку несанкционированное проникновение человека на объект может повлечь за собой как локальную катастрофу, так и глобальную, например, если объект информатизации является критической информационной инфраструктурой. В данной работе ставится задача рассчитать вероятность пропуска нарушителя на объект при использовании различных извещателей, а также при их комбинированном использовании.

### **Анализ периметральных извещателей**

Периметральная сигнализация, как видно из названия, контролирует периметр объекта. Для предотвращения проникновения на объект злоумышленника по периметру устанавливается ограждение, но его можно сломать, через него можно перелезть, под ним можно сделать подкоп. Для контроля попыток преодоления ограждения используются периметральные извещатели, которые вместе с приемо-контрольными приборами составляют периметральную сигнализацию.

Работа разных извещателей основана на различных физических принципах действия. Рассмотрим наиболее популярные периметральный извещатели.

Для контроля целостности полотна ограждения применяются вибрационные извещатели, которые позволяют зафиксировать попытки разреза сетчатого или решетчатого полотна, пролома бетонного полотна, перелаза или подкопа под ограждение. Для предотвращения подкопа под ограждением заливается противоподкопная решетка, на которую и устанавливается извещатель.

Пример установки извещателя вибрационного трибоэлектрического «ГЮРЗА» приведен на рисунке 1 [9]: показано размещение трибокабеля (чувствительный элемент извещателя вибрационного трибоэлектрического), который воспринимает малейшие колебания полотна ограждения, возникающие при попытках его перелаза или разреза. Вероятность обнаружения данным видом извещателя попытки проникновения постороннего на объект составляет не менее 98 % [9].

Еще один извещатель, позволяющий обнаружить проникновение нарушителя на объект, — проводноволновой извещатель. В зависимости от способа установки он может контролировать проникновение нарушителя через полотно ограждения или путем перелаза. На рисунке 2 представлены варианты установки и зоны контроля извещателя охранного линейного проводноволнового «Импульс-12» [10].

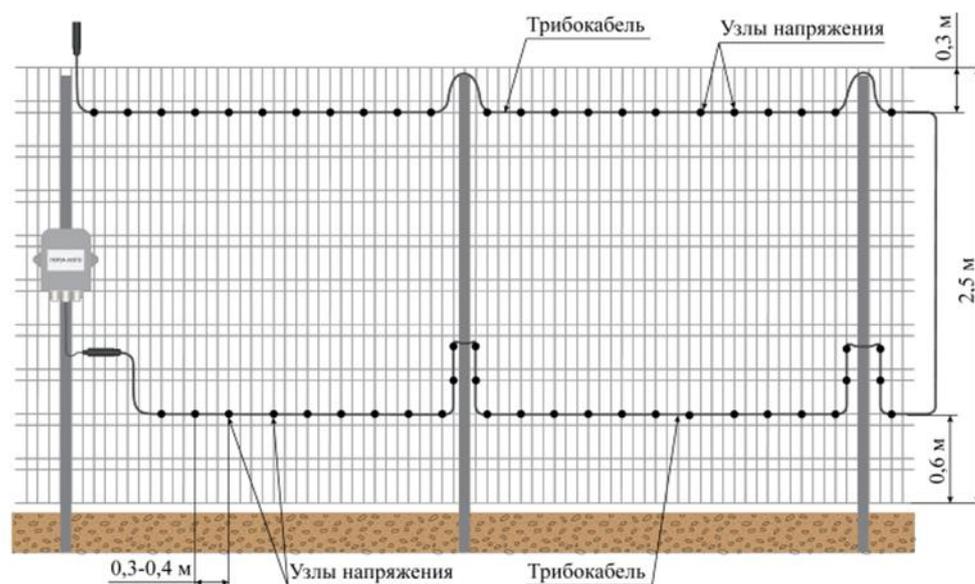


Рис. 1. Пример установки извещателя вибрационного трибоэлектрического

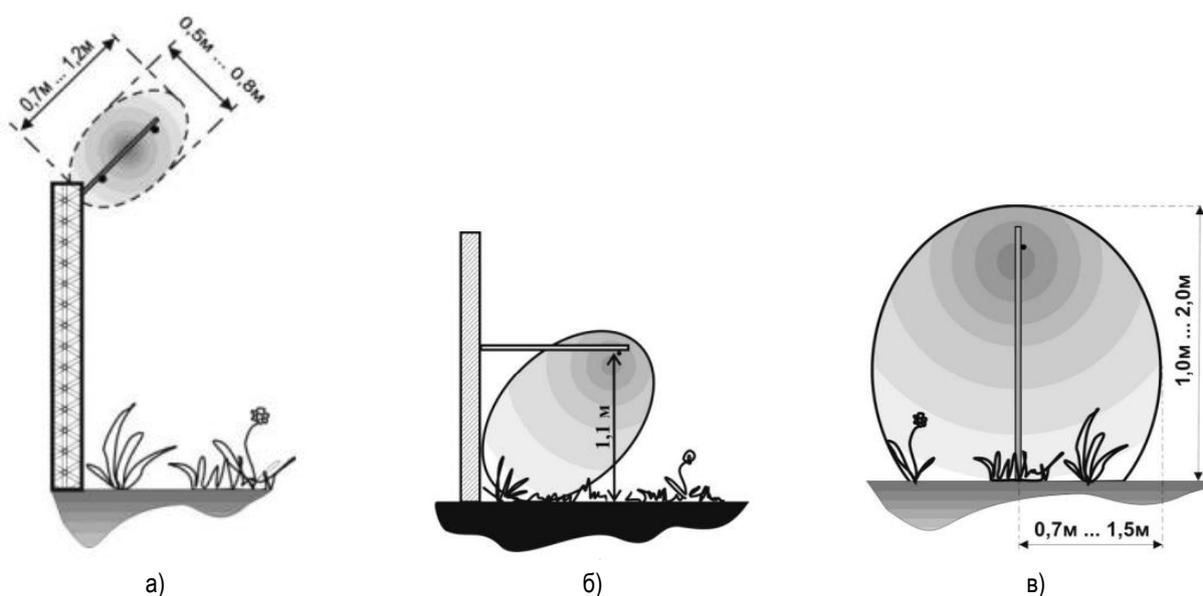


Рис. 2. Варианты установки и зоны контроля извещателя охранного линейного проводноволнового:  
а) в верхней части заграждения; б) вдоль заграждения; в) вдоль поверхности земли

Рассмотрим подробнее вариант установки извещателя проводноволнового. На рисунке 2а показана установка извещателя на противоперелазный козырек: такой метод установки позволяет обнаружить попытки перелаза ограждения. На рисунке 2б показан вариант контроля попыток проникновения через полотно ограждения, а также, в определенных случаях, с помощью подкопа. На рисунке 2в показан вариант монтажа извещателя не на ограждении, а на отдельно стоящих столбах. Подобная установка позволяет контролировать периметр, когда физического ограждения нет, а также – около существующего ограждения на расстоянии. В последнем случае можно обнаружить проникновение нарушителя на объект через полотно ограждения или методом перелаз. Вероятность обнаружения данным видом извещателя попытки проникновения постороннего на объект составляет не менее 98 % [10].

Для защиты периметра объекта также применяются извещатели радиоволновые двухпозиционные (передатчик и приемник). Их принцип действия основан на создании в пространстве между передатчиком и приемником электромагнитного поля, формирующего объемную зону обнаружения в виде вытянутого эллипсоида вращения и регистрации изменений этого поля при пересечении зоны обнаружения нарушителем. На рисунке 3 представлены варианты установки и зоны контроля извещателя охранного радиоволнового двухпозиционного «Барьер» [11].

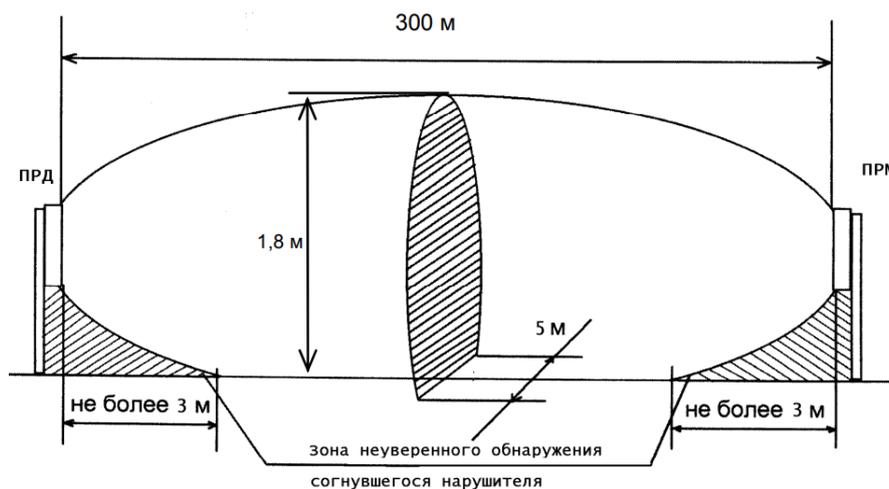


Рис. 3. Варианты установки и зоны контроля извещателя охранного радиоволнового двухпозиционного (ПРД – передатчик, ПРМ – приемники)

На рисунке 3 показано размещение приемника и передатчика извещателя охранного радиоволнового двухпозиционного: высота контролируемой зоны составляет не менее 1,8 м, ширина – не менее 5 м. Вероятность обнаружения данным видом извещателя попытки проникновения постороннего на объект составляет не менее 98 % [11].

Рассмотрим еще один популярный для защиты периметра извещатель – извещатель охранный инфракрасный двухпозиционный (передатчик и приемник) активный. Извещатель формирует в пространстве между передатчиком и приемником невидимые инфракрасные лучи, при прерывании которых нарушителем выдается сигнал тревоги. На рисунке 4 представлена схема лучей извещателя охранного инфракрасного двухпозиционного «МИК» [12].

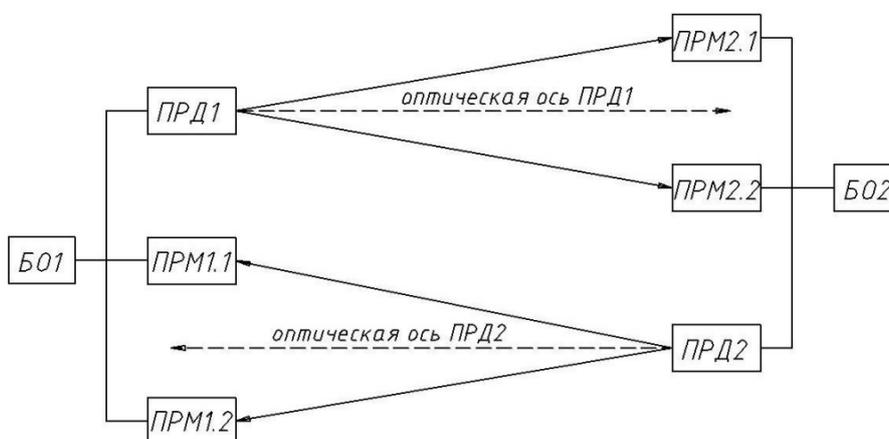


Рис. 4. Схема лучей извещателя охранного инфракрасного двухпозиционного (ПРД – передатчик, ПРМ – приемник, БО – блок обработки)

На рисунке 4 показаны инфракрасные лучи и оптические оси извещателей охранных инфракрасных двухпозиционных. Вероятность обнаружения данным видом извещателя попытки проникновения постороннего на объект составляет не менее 99 % [12].

### Вероятность успешного преодоления периметра объекта

Сведем данные по вероятности обнаружения проникновения нарушителя на объект и вероятности пропуска нарушителя в единую таблицу (см. таблицу 1).

Таблица 1. Вероятности обнаружения и пропуска нарушителя периметральными извещателями

Извещатель	Вероятность обнаружения проникновения нарушителя на объект, %	Вероятность пропуска нарушителя, %
Вибрационный	98	2
Проводноволновой	98	2
Радиоволновой	98	2
Инфракрасный	99	1

Ранее была рассмотрена вероятность обнаружения попытки проникновения постороннего на объект для различных периметральных извещателей. Как правило, на периметре устанавливаются два периметральных извещателя с разными принципами действия. Вероятность пропуска нарушителя при проникновении на объект можно рассчитать по формуле:

$$P_{2ПН} = P_{ПН.1} \cdot P_{ПН.2},$$

где  $P_{2ПН}$  – вероятность пропуска нарушителя при двух извещателях;  $P_{ПН.1}$  – вероятность пропуска нарушителя первого извещателя;  $P_{ПН.2}$  – вероятность пропуска нарушителя второго извещателя.

Рассчитаем вероятность проникновения нарушителя на объект при комбинации различных периметральных извещателей. Отметим, что на практике не рекомендуется использовать комбинацию из проводноволнового и радиоволнового извещателей, поскольку они обладают схожими принципами обнаружения нарушителя. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2. Вероятность обнаружения и пропуска нарушителя комбинацией из двух периметральных извещателей

Извещатели	Вероятность обнаружения проникновения нарушителя на объект, %	Вероятность пропуска нарушителя, %
Вибрационный и проводноволновой	99,96	0,04
Вибрационный и радиоволновой	99,96	0,04
Вибрационный и инфракрасный	99,98	0,02
Проводноволновой и инфракрасный	99,98	0,02
Радиоволновой и инфракрасный	99,98	0,02

При комбинировании вибрационного извещателя с проводноволновым или радиоволновым вероятностью пропуска нарушителя на объект будет составлять 0,04 %. Комбинация инфракрасного извещателя с вибрационным, проводноволновым или радиоволновым даст вероятность пропуска нарушителя на объект равную 0,02 %. При применении на периметре сразу двух извещателей с разным принципом действия вероятность пропуска нарушителя на объект снижается в 50 раз, а вероятность обнаружения попытки проникновения возрастает. Именно поэтому на современных объектах связи и промышленных объектах необходимо оборудовать периметральное ограждение как минимум двумя разными типами извещателей с различными принципами обнаружения проникновения.

Рассчитаем вероятность проникновения нарушителя на объект при комбинации трех периметральных извещателей по формуле:

$$P_{3ПН} = P_{ПН.1} \cdot P_{ПН.2} \cdot P_{ПН.3},$$

где  $P_{3ПН}$  – вероятность пропуска нарушителя при трех извещателях;  $P_{ПН.1}$  – вероятность пропуска нарушителя первого извещателя;  $P_{ПН.2}$  – вероятность пропуска нарушителя второго извещателя;  $P_{ПН.3}$  – вероятность пропуска нарушителя третьего извещателя.

Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3. Вероятности обнаружения и пропуска нарушителя комбинацией из трех периметральных извещателей

Извещатели	Вероятность обнаружения проникновения нарушителя на объект, %	Вероятность пропуска нарушителя, %
Вибрационный, проводноволновой и инфракрасный	99,996	0,004
Вибрационный, радиоволновой и инфракрасный	99,996	0,004

Как видно из таблицы 3, вероятность пропуска нарушителя тремя периметральными извещателями меньше, чем при использовании комбинации из двух извещателей. При этом стоит помнить, что и стоимость самой периметральной сигнализации в этом случае возрастает. Поэтому для большинства объектов рекомендуется применять на периметре два извещателя различного принципа действия. Если объект требует особо надежной защиты, например принадлежит к критической информационной инфраструктуре или проникновение на него может привести к глобальной катастрофе, необходимо применять комбинацию из трех извещателей различного принципа действия.

### Заключение

Из приведенных выше данных можно сделать выводы, что чем больше рубежей периметральных извещателей различного принципа действия установить на ограждение, тем меньше вероятность проникновения нарушителя на объект. Причем при добавлении одного извещателя вероятность проникновения нарушителя на объект уменьшается на 2 порядка. Однако стоит учитывать и стоимость самого оборудования: необходимо построить достаточно защищенную систему, не превышая разумный бюджет.

При разработке и проектировании важно определить максимально возможную вероятность проникновения нарушителя на объект и оптимизировать систему периметральной сигнализации, исходя из выбранного значения.

В дальнейших предполагается исследовать пропуск извещателями нарушителя при различных погодных условиях, а также при попытках нарушителя замаскироваться от различных извещателей. Данные исследования и расчет вероятностей пропуска нарушителя позволят эффективно размещать и настраивать извещатели периметральной сигнализации, что позволит снизить вероятность пропуска нарушителя.

Также при построении комплексной системы безопасности необходимо учитывать, что помимо рассмотренной в данной работе периметральной сигнализации на объектах связи создается и ряд других систем – система видеонаблюдения, система контроля и управления доступом. Работа систем безопасности в комплексе позволяет снизить вероятность пропуска нарушителя на объект.

### Литература

1. Стельмашонок Е. В., Бройдо В. Л., Бугорский В. Н., Буйневич М. В., Васильева И. Н. и др. Безопасность современных информационных технологий. СПб.: СПбГИЭУ, 2012. 406 с.
2. Герлинг Е. Ю., Кулишкина Е. И., Бирих Э. В., Виткова Л. А. Модели нарушителей информационной безопасности // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2017. Т. 35. № 1. С. 27–30.
3. Буйневич М. В., Покусов В. В., Израйлов К. Е. Способ визуализации модулей системы обеспечения информационной безопасности // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России: Научно-аналитический журнал. 2018. № 3. С. 81–91.
4. Кочетков А. А., Казанцева Я. Ю., Чернышева И. Н. Цифровизация производственных процессов на крупных промышленных предприятиях // Управление качеством. 2022. № 2. С. 22–29.
5. Багринцева О. В., Толстых О. В., Никитина Ю. С. Криминальные и террористические посягательства на потенциально опасные объекты топливно-энергетического комплекса // Охрана, безопасность, связь. 2019. Т. 1. № 4 (4). С. 12–15.

6. Корнев Д., Машера А., Михайловский Н., Чернышева И. Современные технологии в области промышленной безопасности и охраны труда // Главный энергетик. 2022. № 2. С. 65–67.
7. Кривошея Д. Г., Ефименко В. Л. Средства контроля и физической защиты периметра потенциально опасных объектов // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 1 (5). С. 368–375.
8. Миняев А. А., Красов А. В. Методика оценки эффективности системы защиты информации территориально-распределенных информационных систем // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2020. № 3. С. 26–32. DOI: 10.46418/2079-8199\_2020\_3\_4
9. Извещатели охранные периметровые трибоэлектрические «ГЮРЗА-035ПЗ» и «ГЮРЗА-035ПЗ» исполнение 1. Руководство по эксплуатации. URL: [https://www.skichel.ru/images/Docementacia/РЭ\\_Гюрза\\_035ПЗ.pdf](https://www.skichel.ru/images/Docementacia/РЭ_Гюрза_035ПЗ.pdf) (дата обращения 20.04.2023)
10. Извещатели охранные линейные для периметров «Импульс-12К». Руководство по монтажу и эксплуатации. URL: <https://www.umirs-m.ru/wp-content/uploads/2019/06/RM-Imp-12k-22.12.15-GK-Omega.pdf> (дата обращения 20.04.2023)
11. Извещатели охранные линейные радиоволновые двухпозиционные «БАРЬЕР» (общего назначения). Руководство по эксплуатации. URL: [https://forteza.ru/files/uploads/Manuals/2022/series%20BARRIER/BARRIER\\_RE\\_2022.09.19.pdf](https://forteza.ru/files/uploads/Manuals/2022/series%20BARRIER/BARRIER_RE_2022.09.19.pdf) (дата обращения 20.04.2023)
12. Извещатель (прибор) охранный оптико-электронный «МИК-03». Руководство по эксплуатации. URL: [https://forteza.ru/files/uploads/Manuals/2019/МИК/МИК-03\\_РЭ\\_2019.11.06.pdf](https://forteza.ru/files/uploads/Manuals/2019/МИК/МИК-03_РЭ_2019.11.06.pdf) (дата обращения 20.04.2023)

**Статья поступила 30 ноября 2023 г.**  
**Одобрена после рецензирования 14 декабря 2023 г.**  
**Принята к публикации 18 декабря 2023 г.**

### **Информация об авторе**

*Герлинг Екатерина Юрьевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защищенных систем связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: [gerling.eu@sut.ru](mailto:gerling.eu@sut.ru)

## Analysis of the Probability of Intruder Penetration into the Facility through the Perimeter

E. Gerling

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Task statement:** *ensuring information security, especially at a communication facility, is an urgent task. An important role here is played by the physical security of the object: the inability of the intruder to enter the protected territory undetected. Perimeter alarm is necessary for early detection of attempts to penetrate a communications facility or industrial facility. Information security depends on its effective and reliable work, as well as the protection of the object from a terrorist attack, the preservation of the life and health of people and other important aspects. **Purpose:** analyze and compare the probabilities of intruder penetration through the fence when using perimeter alarm detectors on the site, based on different principles of operation, as well as when using a combination of these detectors. **Results:** analyzed the effectiveness of perimeter alarm when using detectors based on different principles of operation, as well as when combining these detectors. The calculations of the probability of the intruder overcoming the fence for the cases considered are also given. The principles of detecting the intruder by perimeter alarm detectors based on various principles of operation have been disassembled. Different principles of operation make it possible to detect different attempts to penetrate, therefore, to increase the security of the object, it is recommended to combine different detectors of perimeter alarm. **Practical relevance:** study results are used to select and combine different perimeter alarm detectors. They make it possible to increase the likelihood of early detection of penetration into the object by the intruder, which increases the security of the communication object or industrial object. When using the test results, the selection of detectors is justified by mathematical calculations of the probability of the intruder entering the object unnoticed.*

**Key words:** *perimeter alarm, fencing, probability of intruder penetration, detector, communication object*

### Information about Author

Gerling Ekaterina – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of Secure Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: gerling.eu@sut.ru

УДК 53.05

## Анализ влияния легирования ванадия Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода

Буланов В. Н.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Статья посвящена анализу влияния легирования ванадия различными элементами, такими как Pd, Al, Co и Ni, на процесс растворимости водорода. Цель работы: комплексный анализ воздействия каждого из этих элементов на свойства ванадия в контексте его способности взаимодействовать с молекулами водорода. Полученные результаты представляют практически значимые сведения о том, какие легирующие элементы способны усилить или ослабить растворимость водорода в ванадии, что может быть ключевым фактором для оптимизации материалов водородных хранилищ или катализаторов водородных процессов. Практическая значимость: работа вносит вклад в понимание взаимодействия металлов с водородом и может быть полезной для разработки эффективных материалов в области энергетики и катализа.*

**Ключевые слова:** ванадий, легирование, Pd (палладий), Al (алюминий), Co (кобальт), Ni (никель), растворимость водорода, влияние легирования, водород в металлах, химические свойства металлов, катализаторы

### Введение

Одним из перспективных направлений исследований в области водородных технологий является анализ влияния легирования ванадия различными элементами на растворимость водорода. Эта тема не только актуальна, но и обладает высоким потенциалом для создания водородопроницаемых материалов мембран с уникальными характеристиками, что становится ключевым фактором в различных промышленных и технологических приложениях.

Ванадий и его сплавы играют стратегическую роль в различных отраслях современных технологий. Ванадиевые титаны применяются в авиации и аэрокосмической промышленности, обладая высокой прочностью и устойчивостью к высоким температурам. Ванадиевые стали широко используются в производстве инструментов и машинных деталей, повышая прочность и твердость материала. Ванадиевые аккумуляторы исследуются для применения в энергетике и электронике, обеспечивая высокую электропроводность и долговременное хранение энергии. Ванадий также используется в качестве катализатора в химических процессах, способствуя эффективности промышленных реакций. Значительные инвестиции в исследования в области ванадия свидетельствуют о стремлении использовать его уникальные свойства для создания более эффективных и экологически чистых технологий.

Уточнение направления и условий использования ванадиевых сплавов зависит от их состава и свойств. Например, ванадиевые сплавы с Pd, Al, Co, Ni обещают уникальные свойства в контексте взаимодействия с водородом и изготовления на их основе водородопроницаемых мембран. Исследования ванадиевых сплавов проводятся в интересах разработки новых материалов для хранения и выделения/переноса водорода, что важно для развития возобновляемой энергетики и технологий водородного топлива [1–3].

### Библиографическая ссылка на статью:

Буланов В. Н. Анализ влияния легирования ванадия Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 2. С. 5. EDN: ULXVML

### Reference for citation:

Bulanov V. Analysis of the Effect of Vanadium Doping Pd, Al, Co, Ni on Hydrogen Solubility // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 2. P. 5. EDN: ULXVML

Обзор релевантных работ подчеркивает, что интерес к ванадию и его сплавам не только сохраняется, но и усиливается в свете современных вызовов и потребностей технологического развития. В частности, анализ влияния легирования ванадия Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода представляет собой актуальное направление в данной области исследований.

Водород играет важную роль в энергетике, транспорте и промышленности, как перспективный источник энергии и средство ее хранения. В этом контексте разработка материалов с повышенной растворимостью водорода становится критически важной задачей. Легирование ванадия такими элементами, как Pd, Al, Co, Ni, представляет собой перспективный способ совершенствования его свойств при работе в водородной газовой среде. Изучение влияния этих легирующих элементов на растворимость водорода может способствовать созданию новых материалов, обладающих оптимальными характеристиками для хранения элемента и его выделения из газовых смесей.

Перспективы применения ванадиевых сплавов открывают широкие возможности для развития новых технологий и продуктов в различных областях науки и промышленности:

- развитие водородной энергетики (инновационные решения для хранения, транспортировки и использования водорода в различных промышленных и бытовых сферах);
- энергоэффективные транспортные средства, использующие водородные топливные элементы (повышенная растворимость водорода может улучшить плотность энергии, что важно для увеличения дальности поездок);
- экологически чистые катализаторы, способствующие развитию устойчивых производственных процессов и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Результаты исследований по влиянию легирования ванадия на растворимость водорода открывают перспективы для создания новых материалов, способных обозначить область хранения и использования водорода в различных технологических и промышленных приложениях [4].

Основной целью данного исследования является выделение ключевых особенностей воздействия легирующих элементов (Pd, Al, Co, Ni) на растворимость водорода в сплавах ванадия. Полученные результаты могут послужить основой для дальнейших технологических разработок в области создания материалов с оптимизированными характеристиками водородной активности, имеющих потенциальное применение в различных сферах промышленности и транспорта.

## Основные параметры анализируемых сплавов

### 1. Сравнительные характеристики образцов сплавов

Изучение влияния легирования ванадия элементами Pd, Al, Co, Ni предполагает детальный анализ сравнительных характеристик образцов сплавов (в соответствии с заданными требованиями). Каждый из сплавов обладает уникальными свойствами, которые определяются содержанием легирующих элементов.

### 2. Измеряемые параметры

В рамках данного анализа определяются три ключевых параметра, отражающих влияние легирования на свойства ванадиевых сплавов по отношению к водороду.

#### 1) Растворимость водорода:

- измерение способности ванадиевого сплава поглощать водород при различных условиях;
- экспериментальные данные позволяют определить предельную растворимость водорода в каждом из сплавов.

#### 2) Диффузия водорода:

- оценка скорости переноса атомов водорода внутри кристаллической решетки сплава;
- данные о диффузии водорода в сплаве позволяют определить, насколько эффективно водород может проникать внутрь материала.

#### 3) Водородопроницаемость сплавов ванадия:

- определение способности водорода проникать через структуру сплавов.

Эти данные важны для оценки применимости сплавов в системах хранения водорода и транспорте.

### 3. Описание методов измерения параметров

В интересах измерения *растворимости водорода* применяется метод вакуумного термогравиметрического анализа, позволяющий определить изменение массы образца в процессе поглощения водорода. Для определения скорости *диффузии* используются изотопная метка водорода и масс-спектрометрия. Степень *водородопроницаемости* определяется измерением потока водорода через образец при различных давлениях и температурах (метод газопроницаемости). Процесс проведения эксперимента требует наличия специальных установок, в которых создаются определенные условия давления и температуры. Образец материала помещается в систему, и затем фиксируется количество водорода, проникающего через него за определенное время при заданных условиях. Этот метод важен для оценки материалов, используемых в технических приложениях, где большое значение имеет минимизация утечек водорода. Метод газопроницаемости позволяет оценить эффективность применения материала в промышленности, энергетике и других областях.

Комбинация этих методов обеспечивает комплексный анализ влияния легирования Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода в готовых ванадиевых сплавах. Полученные данные позволяют выделить ключевые особенности каждого образца и сформировать представление о свойствах водорода этих материалов [4–6].

## Экспериментальная часть

### 1. Описание условий проведения экспериментов

В рамках исследования были проведены два основных эксперимента в целях оценки влияния различных добавок на свойства сплавов.

*Первый эксперимент* направлен на сравнение эффекта Pd и Al на свойства сплава. Для этого были подготовлены три различных сплава с разными соотношениями добавок: Sp1 (90 % ванадия, 5 % Pd, 5 % Al), Sp2 (90 % ванадия, 10 % Pd), Sp3 (90 % ванадия, 10 % Al). Эксперимент проводился при температуре 1200°C в вакууме ( $10^{-3}$  мбар) в течение 2 часов. Это позволило оценить, как эти добавки влияют на структуру и свойства сплава в условиях, приближенных к его реальному использованию.

*Второй эксперимент* был направлен на изучение влияния Co и Ni на механические свойства сплава. Для этого были подготовлены три сплава: Sp1 (80 % ванадия, 10 % Co, 10 % Ni), Sp2 (85 % ванадия, 7,5 % Co, 7,5 % Ni), Sp3 (90 % ванадия, 5 % Co, 5 % Ni). Эксперимент проводился при температуре 1100°C под давлением 50 атмосфер в течение 3 часов. Цель состояла в определении оптимальных соотношений Co и Ni для достижения желаемых механических свойств сплава.

Результаты этих экспериментов предоставляют практически ценную информацию в интересах применения сплавов в промышленности и научной деятельности, для оптимизации процессов их синтеза и улучшения свойств, что в свою очередь способствует разработке более эффективных материалов для различных областей применения (промышленности, электроники, медицины).

### 2. Графики реализуемых экспериментов

На рисунке 1 видно, как изменяется концентрация водорода в сплавах Pd-V и Al-V (сверху) в течение времени при определенных условиях, а также в сплавах Co-V и Ni-V (снизу). Зависимость скорости диффузии водорода от концентрации легирующих элементов (Pd, Al, Co, Ni) для экспериментов, проведенных с ванадиевыми сплавами при различных условиях получения пленки, представлена на рисунке 2. График демонстрирует, как изменение концентрации легирующих элементов влияет на скорость диффузии водорода в материале, позволяя выявить тенденции влияния этих элементов на процесс диффузии.

Представленные результаты экспериментов позволяют сделать выводы о динамике действий растворимости водорода и диффузии в исследуемых ванадиевых сплавах при следующих условиях:

- температура 1200°C, время выдержки 2 часа и давление в вакууме  $10^{-3}$  мбар (для первого эксперимента);
- температура 1100°C, время выдержки 3 часа и давление 50 атмосфер (для второго эксперимента).

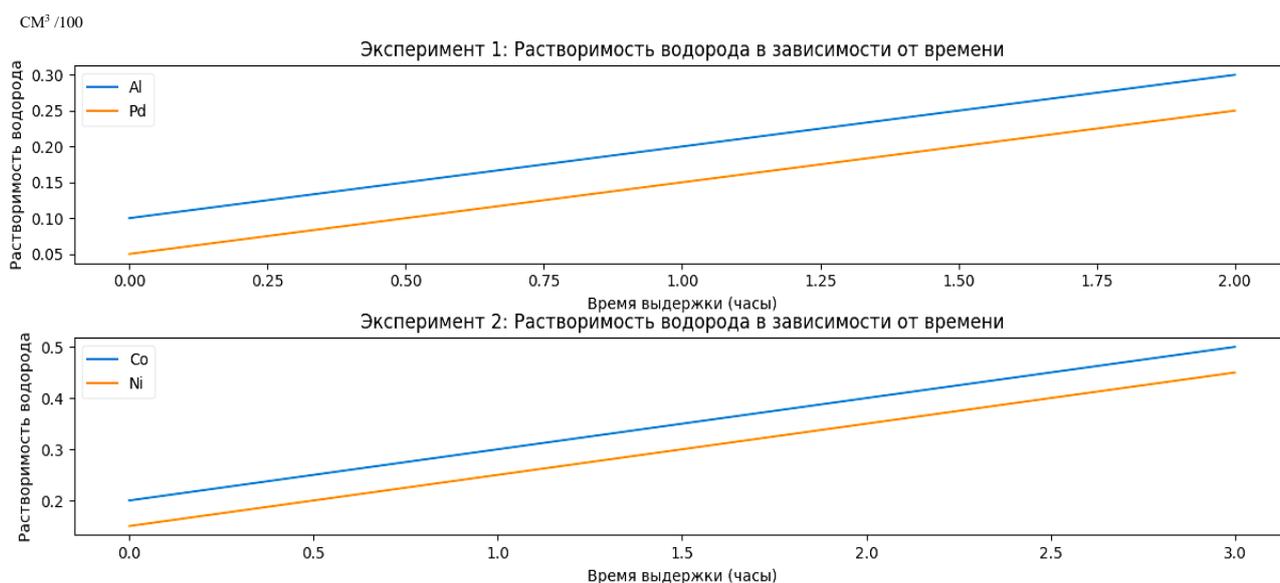


Рис. 1. График растворимости водорода в зависимости от времени для каждого сплава

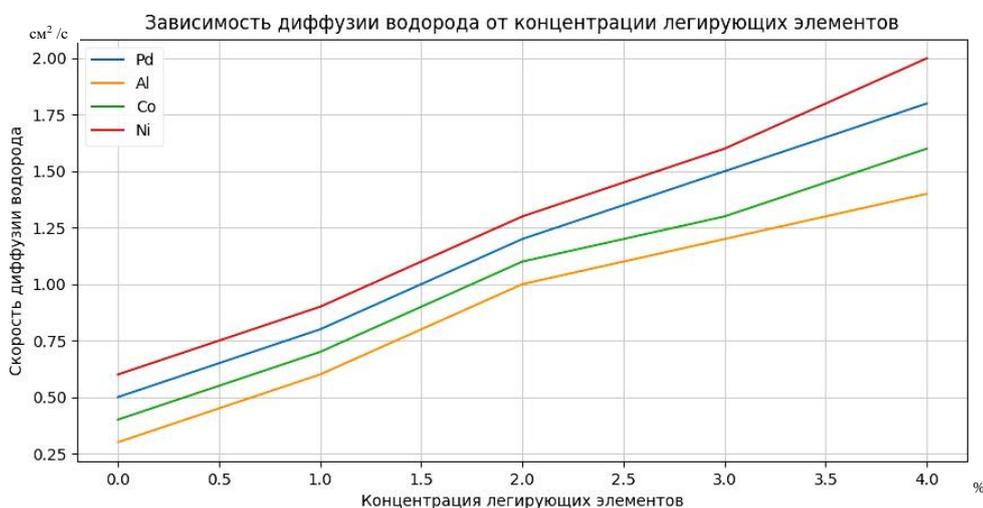


Рис. 2. График зависимости диффузии водорода от концентрации легирующих элементов

Дальнейший анализ полученных данных позволит выявить, какие конкретные параметры процесса легирования (например, содержание Pd, Al, Co, Ni) оказывают наибольшее влияние на водородные свойства материала. Исследование поможет оптимизировать процессы легирования с целью улучшения водородных свойств сплавов, что важно для их применения в областях, требующих высокой прочности и коррозионной стойкости. Экспериментальные данные были исследованы для оценки растворимости водорода в ванадиевых мембранах, полученных различными методами производства (тип примеси и уровень легирования ею). Кроме того, это позволило выявить, как заданные (в экспериментах) параметров процесса легирования влияют на водородные свойства материала и определить оптимальные условия для достижения требуемых характеристик мембран [7].

## Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов были получены данные о влиянии легирования ванадия элементами Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода. В рамках первого эксперимента было проведено сравнение воздействия Pd и Al в определенных условиях (температура, время выдержки, давление) на свойства сплава, варьируя их концентрации в трех различных сплавах. Второй эксперимент направлен на анализ влияния Co и Ni на механические свойства сплава при различных концентрациях

этих элементов также при заданных условиях (отличных от условий для первого эксперимента). Параметры температуры, времени и давления были выбраны в целях исследования кинетики процессов растворимости и диффузии водорода в сплавах. Полученные данные позволяют более глубоко понять взаимосвязь между составом сплава, условиями эксперимента и его химическими свойствами.

Проведенные исследования расширили знания о взаимодействии элементов в ванадиевых сплавах и помогли выявить потенциальные области применения этих материалов в различных технологических и промышленных сферах. Разработанные материалы могут использоваться для создания легких и прочных деталей в авиации, для производства компонентов автомобилей, создания энергетических установок, медицинских инструментов и имплантатов, а также в промышленном оборудовании, повышая эффективность и долговечность конструкций.

### Выводы

Эксперименты по изучению свойств ванадиевых сплавов, основанные на различных добавках, обеспечили практически значимые результаты, которые могут быть важны для промышленных и научных приложений. Во время первого эксперимента, где анализировалось влияние добавок Pd и Al на свойства сплавов при температуре 1200°C и вакууме, обнаружилось следующее: сплавы с более высоким содержанием Pd или Al демонстрировали улучшенные механические характеристики по сравнению с базовым сплавом. Например, сплав 2 (с 10 % атомарных Pd) и сплав 3 (с 10 % атомарных Al) проявили более высокую механическую прочность и устойчивость к высокой температуре. Это указывает на потенциальную эффективность Pd и Al как добавок для улучшения свойств ванадиевых сплавов при высоких температурах и в условиях вакуума. Во втором эксперименте, где изучалось влияние Co и Ni на механические свойства сплавов при температуре 1100°C и давлении 50 атмосфер, выявлено следующее: изменение соотношения Co и Ni в сплаве также существенно влияет на его свойства. Например, сплав 1 (с 10 % Co и 10 % Ni) и сплав 3 (с 5 % Co и 5 % Ni) имели различные значения механической прочности и упругости. Это указывает на важность оптимизации концентрации Co и Ni для достижения оптимальных характеристик ванадиевых сплавов при высоких давлениях и умеренных температурах.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что добавки Pd, Al, Co и Ni могут значительно модифицировать свойства ванадиевых сплавов, что открывает перспективы для их использования в высокотемпературных приложениях, катализе и энергетике. Дальнейшие исследования в этом направлении могут сосредоточиться на оптимизации концентрации добавок и разработке новых методов синтеза для получения сплавов с желаемыми характеристиками [8–11].

Сравнительный анализ характеристик различных сплавов реализованных экспериментов подтверждает, что каждый из легирующих элементов вносит свой вклад в увеличение растворимости водорода в ванадии. Co и Ni проявляются как наиболее эффективные легирующие элементы в контексте повышения водородной активности. В то время как Pd и Al тоже оказывают положительное воздействие, их влияние несколько уступает Co и Ni. Результаты исследования могут служить основой для разработки новых материалов с оптимизированными характеристиками водородной активности в зависимости от конкретных требований применения. Дальнейшие исследования могут включать в себя оптимизацию концентраций легирующих элементов и адаптацию структуры сплавов для более эффективного взаимодействия с водородом [12–13].

### Практическое применение

Результаты экспериментов по изучению влияния различных добавок на свойства ванадиевых сплавов имеют практическое значение для научных и промышленных приложений. В частности, выявленные улучшения механических характеристик сплавов с добавками Pd, Al, Co и Ni при высоких температурах и давлениях подчеркивают их потенциал для различных областей применения. Кроме того, на основе полученных экспериментальных данных возможны дальнейшие исследования в области материаловедения и металлургии. Оптимизация концентрации добавок и разработка новых методов синтеза сплавов с желаемыми характеристиками открывают перспективы для создания более эффективных и устойчивых материалов для высокотемпературных приложений: конструктивных элементов в аэрокос-

мической промышленности или элементов ядерных реакторов. Улучшенные свойства ванадиевых сплавов могут быть использованы для создания более эффективных катализаторов, а также в целях разработки более надежных и эффективных компонентов для систем хранения и транспортировки водорода, что особенно актуально в контексте развития водородной энергетики.

Результаты проведенных экспериментов не только расширяют научное понимание о свойствах ванадиевых сплавов, но и предоставляют практически значимую информацию для различных промышленных областей, где эти материалы могут быть применены для создания инновационных технологий и продуктов.

### Заключение

В результате проведенного исследования по влиянию легирования ванадия элементами (Sp1 с составом 90 % ванадий, 5 % Pd и 5 % Al; Sp2 с составом 90 % ванадий; 10 % Pd, и Sp3 с составом 90 % ванадий и 10 % Al) на растворимость водорода в ванадиевых сплавах были получены практически значимые данные в условиях специальной лаборатории, которые имеют научное значение для различных областей применения водорода.

Было обнаружено, что легирование палладием (Pd), алюминием (Al), кобальтом (Co), и никелем (Ni) способствует улучшению растворимости водорода в ванадии, при этом различные легирующие элементы проявляют разную эффективность. Эти результаты могут быть использованы в различных технологических секторах (энергетика, хранение энергии, транспорт и катализаторы).

После того, как будут завершены последние этапы исследования и определены ключевые области, требующие развития, будет предположено дальнейшее исследование:

1) оптимизация состава сплавов: более глубокое понимание оптимальных концентраций легирующих элементов для достижения максимальной растворимости водорода;

2) структурные изменения: включает в себя анализ кристаллической структуры и микроструктуры материала;

3) технологические применения: развитие конкретных технологических решений на основе полученных результатов; например, создание новых материалов для эффективных систем хранения водорода;

4) экономическая целесообразность и практическая реализуемость использования ванадиевых сплавов в технологических и промышленных приложениях;

5) оценка экологической устойчивости ванадиевых сплавов и их воздействия на окружающую среду при применении в различных сферах.

Дальнейшее применение в этих областях могут значительно расширить наше понимание о свойствах водорода ванадиевых сплавов и расширить их практическое применение в различных областях промышленности и технологий. Эти усилия могут также способствовать развитию инновационных и экологически устойчивых решений в области энергетики и транспорта [14].

### Литература

1. Ординарцев Д. П., Свиридов А. В., Свиридов В. В. Адсорбционное извлечение ванадия, молибдена и вольфрама из кислых растворов на модифицированном монтмориллоните // Журнал физической химии. 2018. Т. 92. № 10. С. 1648–1652. DOI:10.1134/S0044453718100229. EDN:YMFVZZ
2. Чуларис А. А. Физико-химические и металлургические основы процессов жидкофазного образования комбинированных соединений титана. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1997. EDN:ZLRUND
3. Сирота Н. Н., Смольянинова Э. А., Стрибук Е. К., Федотов А. К., Шиманская Н. М. и др. Влияние чистоты и легирования переходными элементами на сверхпроводимость ванадия, ниобия и ванадий-ниобиевых сплавов // Доклады Академии наук СССР. 1976. Т. 231. № 5. С. 1116–1118. EDN:RSHPZG.
4. Кравченко Н. Ю. Физика: учебник и практикум для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2024. 300 с.
5. Алимов В. Н., Буснюк А. О., Лившиц А. И., Ноткин М. Е., Передистов Е. Ю. Композитные водородопроницаемые мембраны на основе ванадия: эффекты легирования палладием // IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сборник научных статей в 2 томах. СПбГУТ: 2015. С. 603–608. EDN:UNVRRV

6. Калашников Н. П., Муравьев С. Е. Физика: учебник и практикум для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2024. 496 с.
7. Родионов В. Н. Физика: учебное пособие для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2023. 265 с.
8. Белякова Р. М., Курбанова Э. Д., Сидоров Н. И., Полухин В. А. мембраны на основе Nb–Ni и V–Ni для получения сверхчистого водорода // Расплавы. 2022. № 2. С. 124–140. DOI:10.31857/S0235010622020025. EDN:MGPXVM
9. Айзензон А. Е. Физика: учебник и практикум для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2023. 335 с.
10. Кравченко Н. Ю. Физика: учебник и практикум для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2024. 300 с.
11. Горлач В. В. Физика. Задачи, тесты. Методы решения: учебное пособие для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2023. 343 с.
12. Банников Г. И., Маюров А. С., Рудслав А. С. Электрохимия водородосодержащих систем. М.: Наука, 2009.
13. Бордовский Г. А., Бурсиан Э. В. Физика: учебное пособие для среднего профессионального образования в 2 т. Т. 1. М.: Издательство Юрайт, 2024. 242 с.
14. Сипатов И. С. Структура и физико-химические свойства водородопроницаемых сплавов ванадия с никелем, кобальтом и титаном. Дис. ... канд. хим. наук. Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, 2021.

**Статья поступила 01 декабря 2023 г.**  
**Одобрена после рецензирования 22 декабря 2023 г.**  
**Принята к публикации 25 декабря 2023 г.**

#### **Информация об авторе**

*Буланов Владислав Николаевич* – аспирант кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: [bvn1998@yandex.ru](mailto:bvn1998@yandex.ru)

## Analysis of the Effect of Vanadium Doping Pd, Al, Co, Ni on Hydrogen Solubility

V. Bulanov

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*The main purpose of this study is to identify the key features of the effect of alloying elements (Pd, Al, Co, Ni) on the solubility of hydrogen in vanadium alloys. The results obtained can serve as a basis for further technological developments in the field of creating materials with optimized characteristics of hydrogen activity, which have potential applications in various fields of industry and transport.*

**Key words:** Vanadium, Alloying, Pd (palladium), Al (aluminum), Co (cobalt), Ni (nickel), Hydrogen solubility, Effect of alloying, Hydrogen in metals, Chemical properties of metals, Catalysts

### Information about Authors

*Bulanov Nikolaevich* – Ph.D. student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: [bvn1998@yandex.ru](mailto:bvn1998@yandex.ru)

ДАТА ВЫХОДА В СВЕТ 29.12.2023

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**

Выпускающий редактор **Берзина Е.В.**

Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Дизайн: **Коровин В.М.**

Изображение на обложке с сайта <http://www.freepik.com>