

СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ

от самоорганизации к искусственному интеллекту

Апрель – Июнь

№ 2 (51), 2024

Главный редактор Старцев В.В. (к.т.н., Институт системологии)

Зам. главного редактора Князева Е.Н. (д.филос.н., профессор НИУ ВШЭ)

Редакционный Совет

Боголепова И.Н. (академик РАН, д.мед.н., проф., зав.лаб. научного Центра неврологии РАМН, Москва, Россия); **Гершензон К.** (д.ф.-м.н. (PhDr), проф. Национального автономного университета города Мехико, Мексика); **Эрди П.** (д.ф.-м.н. (PhDr), Центр по исследованию сложных систем в Колледже Каламазу, штат Мичиган, США); **Игамбердиев А.У.** (д.б.н.(PhDr), проф. факультета биологии Университета Ньюфаундленда, Канада); **Майнцер К.** (д.филос.н.(PhDr), зав. каф. философии и теории науки Технического университета Мюнхена, президент Германского общества сложных систем и нелинейной динамики, Мюнхен, Германия); **Малинецкий Г.Г.** (д.ф.-м.н., проф., Институт прикладной математики (ИПМ) им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия); **Панин В.Е.** (академик РАН, д.ф.-м.н., проф., Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия); **Поспелов И.Г.** (чл.-кор. РАН, д.ф.-м.н., проф., зав. отделом Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН, Москва, Россия); **Хофкирхнер В.** (д.филос.н. (PhDr), президент Центра Берталанфи по изучению науки о системах, Вена, Австрия)

Редакционная коллегия

Голиченков В.А. (д.б.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Клиге Р.К.** (д.геогр.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Куркина Е.С.** (д.ф.-м.н., МГУ, Москва, Россия); **Магницкий Н.А.** (д.ф.-м.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Мелехова О.П.** (д.б.н., МГУ, Москва, Россия); **Орынбасаров А.С.** (к.т.н., НПО "Инновационные нанотехнологии Казахстана", Астана, Казахстан); **Ризниченко Г.Ю.** (д.ф.-м.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Сафьянов Г.А.** (д. геогр. н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Суриков В.В.** (д.ф.-м.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Чуличков А.И.** (д.ф.-м.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Шанявский А.А.** (д.т.н., проф., ФАУ «Государственный центр «Безопасность полетов на воздушном транспорте», Москва, Россия), **Лада О.В.** (Институт системологии, Москва, Россия; выпускающий редактор)

УЧРЕДИТЕЛЬ: АО «Институт фундаментальных системных исследований»

Междисциплинарный научный журнал «СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-73604 от 31.08.2018 г.

ISSN № 2220-8569

Сдано в набор 29.04.2024. Подписано в печать 04.06.2024. А4, бумага 80 гр. офсетная, печать 4+4 цветная. Обложка 250 гр, печать 4+0, глянцевая ламинация. КБС. Тираж 50 экз. Цена свободная.

Издательство: АО «Институт фундаментальных системных исследований»

Адрес редакции и издательства: 111402, Россия, Московская область, Лыткарино, Парковая.1

Тел./Факс: +7(495) 941-62-72 <http://thecomplexsystems.ru/>; e-mail: mail@systemology.ru

Подписной индекс 88852

Компьютерная верстка издательства АО «Институт системологии»

Типография ООО РПК «ВАШ ФОРМАТ», Россия, 115419, г. Москва, Малая Калужская, 15, корпус 17

© «Сложные системы: от самоорганизации к искусственному интеллекту», 2024

© Коллектив авторов, 2024

Перепечатка и перевод статей – только со ссылкой на журнал

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

- Наумов А. В.** Энтропия: системный взгляд из 2024 года 4
- Желтков М. А.** Принцип дополнительности Н. Бора и его прогноз мировой электроэнергетики до 2040 года как сложной системы: методология, нелинейные эффекты, множественность траекторий 16
-

Новые идеи, походы

- Истомина Н. Л.** Системный подход к проектированию оптико-электронных приборов и комплексов: современное состояние, проблемы и перспективы 30
-

Дискуссионные аспекты

- Брюсов И. И.** Философские проблемы государственного управления в современной России: онтологические, аксиологические и технологические вызовы 65

CONTENTS

Fundamental Research

Naumov A. V. Entropy: a systems perspective from 2024	4
Zheltkov M. A. N. Bohr's Principle of Complementarity and His Forecast of Global Electric Power Industry Development through 2040 as a Complex System: Methodology, Nonlinear Effects, and Multiplicity of Trajectories.	16

New ideas, approaches

Istomina N. L. Systems Approach to the Design of Optoelectronic Devices and Systems: Current State, Challenges, and Prospects	30
--	-----------

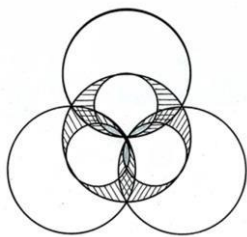
Debatable aspects

Bryusov I. I. Philosophical problems of public administration in contemporary Russia: ontological axiological and technological challenges	65
---	-----------

ЭНТРОПИЯ: СИСТЕМНЫЙ ВЗГЛЯД ИЗ 2024 ГОДА

Наумов А. В. (руководитель направления) АО «ОКБ «Астрон»

Naumov_arkadii@mail.ru



Аннотация. Энтропия, оставаясь одним из самых фундаментальных и одновременно сложных для интуитивного понимания понятий современной физики, в 2024 году переживает новый виток концептуального развития. Данная работа предлагает систематический обзор современного состояния исследований энтропии, синтезируя классические термодинамические и статистические подходы с новейшими достижениями в квантовой гравитации, космологии и теории информации. В статье последовательно анализируются три взаимосвязанных аспекта энтропии: как меры необратимого рассеяния энергии в замкнутых системах, как меры статистического веса макросостояния и как меры информационной неопределённости. Особое внимание уделяется ключевым мифам и заблуждениям, окружающим второе начало термодинамики, включая вопросы субъективности энтропии, её связи со стрелой времени, а также мнимого противоречия между энтропийным законом и биологической эволюцией. В работе показано, что закон неубывания энтропии, являясь статистическим по своей природе, не запрещает локального уменьшения энтропии в открытых системах и, более того, выступает необходимым условием для самоорганизации и роста сложности. На основе анализа новейших данных по ускоренному расширению Вселенной, роли тёмной энергии и квантовой запутанности, в частности гипотезы $ER = EPR$, делается вывод о том, что энтропия представляет собой ключевую концептуальную ось, связывающую микроскопический квантовый мир с макроскопической термодинамикой и глобальной космологической динамикой.

Ключевые слова: энтропия, второе начало термодинамики, стрела времени, квантовая запутанность, космология, тёмная энергия, самоорганизация, сложность, энтропийная гравитация.

Введение

«Доступная энергия – это главный объект, поставленный на карту в борьбе за существование и эволюцию мира». С этим утверждением Людвиг Больцмана, высеченным, вероятно, на незримой плите фундамента науки, трудно не согласиться и спустя полтора столетия. Если первый закон термодинамики – закон сохранения энергии – постулирует количество энергии в изолированной системе, то второй закон говорит о её качестве, о неизбежной деградации энергии, её переходе из более полезных, упорядоченных

форм в менее полезные, хаотичные. Именно эта направленность процессов, которую Рудольф Клаузиус в 1865 году назвал энтропией (от греч. *ἐντροπία* – поворот, превращение), предопределяет необратимость времени, или «стрелу времени», на макроскопическом уровне.

К 2024 году понятие энтропии далеко вышло за рамки классической термодинамики паровых машин, проникнув в квантовую механику, космологию, теорию информации, нейронауки и даже социальные науки. Тем не менее, вокруг этого понятия сохраняется множество мифов и упрощений, которые вводят в заблуждение не только студентов, но и некоторых исследователей. Например, энтропию часто сводят к бытовому «беспорядку», что, как будет показано далее, является метафорой, имеющей ограниченную применимость. Ситуацию усугубляет тот факт, что существуют различные, на первый взгляд не связанные между собой, определения: термодинамическое (мера рассеяния энергии), статистическое (вероятность состояния) и информационное (мера неопределённости).

Цель данной работы – не просто дать обзор понятия энтропии, но и предложить непротиворечивый, системный взгляд по состоянию на 2024 г. на её проявления на разных масштабах – от микрочастиц до всей Вселенной. Мы рассмотрим актуальное состояние исследований в области квантовой энтропии, энтропии чёрных дыр, космологической энтропии и её связи с тёмной энергией, а также проанализируем роль энтропии в процессах самоорганизации. Отдельное внимание будет уделено критическому разбору устойчивых мифов, которые, как показали исследования 2024 года, всё ещё служат источником концептуальных ошибок и даже используются для отрицания как второго закона термодинамики, так и теории эволюции.

Представленный анализ опирается на работы, опубликованные в рецензируемых журналах до 2024 года включительно, а также на новейшие препринты, отражающие текущий фронт исследований. Этот обзор призван служить как введением для тех, кто впервые сталкивается с концепцией энтропии, так и структурированным источником актуальных ссылок для специалистов, работающих на стыке физики, биологии и наук о сложности.

1. Эволюция понятия энтропии: от тепловых машин до теории информации

1.1. Классическое термодинамическое определение

Исторически энтропия возникла как абстрактная, но необходимая функция состояния термодинамической системы. Рудольф Клаузиус, обобщая работу Сади Карно о циклах тепловых машин, сформулировал второе начало термодинамики в виде принципа, запрещающего самопроизвольный переход тепла от холодного тела к горячему. Количественно энтропия была определена через приведённое тепло: $dS = \delta Q_{\text{обр}}/T$, где $\delta Q_{\text{обр}}$ – бесконечно малое количество теплоты, полученное системой в обратимом процессе, а T – абсолютная температура. Это

определение тесно связывает энтропию с диссипацией энергии: энергия остаётся постоянной в замкнутой системе (первое начало), но её способность совершать работу неуклонно снижается по мере выравнивания температур и роста энтропии.

В изолированной системе, согласно Клаузиусу и последующей формулировке Джозайи Гиббса, процессы могут протекать только в сторону увеличения энтропии ($\Delta S \geq 0$), достигая максимума в состоянии термодинамического равновесия. Именно эта формулировка породила мрачные прогнозы о «тепловой смерти Вселенной» – состоянии, в котором вся энергия окажется равномерно распределённой в виде тепла, и никакая работа станет невозможной. Сегодня, однако, мы знаем, что этот прогноз не учитывал гравитацию и расширение Вселенной.

1.2. Статистическое обоснование Больцмана

Ключевой прорыв в понимании сути энтропии был совершён Людвигом Больцманом, который в 1877 году связал её с вероятностью состояния системы. Знаменитая формула, выгравированная на его надгробии, $S = k_B \ln \Omega$, где Ω – число микросостояний, соответствующих данному макросостоянию, раскрыла статистическую природу второго закона. Оказалось, что энтропия растёт не в силу какого-то абсолютного динамического запрета, а просто потому, что существует *гораздо больше способов* реализовать высокоэнтропийное состояние (например, равномерно распределённый газ), чем низкоэнтропийное (хаотично движущиеся молекулы газа, собравшиеся в углу сосуда).

Эта вероятностная трактовка снимает фаталистический оттенок со второго закона: физически ничто не запрещает энтропии уменьшиться. Вероятность такого события, однако, для систем из большого числа частиц ($\sim 10^{23}$) настолько ничтожно мала, что его можно игнорировать. Аналогия с монетами, приведённая во введении к данной статье, наглядно демонстрирует этот принцип: чем больше монет, тем выше вероятность получить примерно равное количество «орлов» и «решек» (максимальная энтропия) и тем меньше – все «орлы» (минимальная энтропия).

1.3. Информационная перспектива

С развитием теории информации, начатым Клодом Шенноном, а затем и квантовой механики, энтропия обрела новое, ещё более глубокое значение – меры неопределённости или недостающей информации о состоянии системы. Энтропия Шеннона, формально совпадающая с энтропией Больцмана для равновероятных состояний, описывает информационную ёмкость источника сообщений. С этой точки зрения, высокоэнтропийное состояние (например, газ) – это состояние, о котором мы мало что знаем на микроскопическом уровне: нам известны лишь макроскопические параметры, но не положение каждой молекулы. Низкоэнтропийное состояние (например, идеальный кристалл при температуре, близкой к абсолютному нулю) обладает

высокой степенью упорядоченности, и для его полного описания требуется значительно меньше информации.

Важно подчеркнуть, что энтропия как мера неопределённости *не является субъективной*, вопреки распространённому мифу. Хотя знание наблюдателя о системе может быть неполным, сама энтропия – объективное свойство, определяемое числом степеней свободы системы и её внутренней структурой. Энтропия воды выше энтропии льда, независимо от того, кто и как на неё смотрит, поскольку у молекул воды больше степеней свободы.

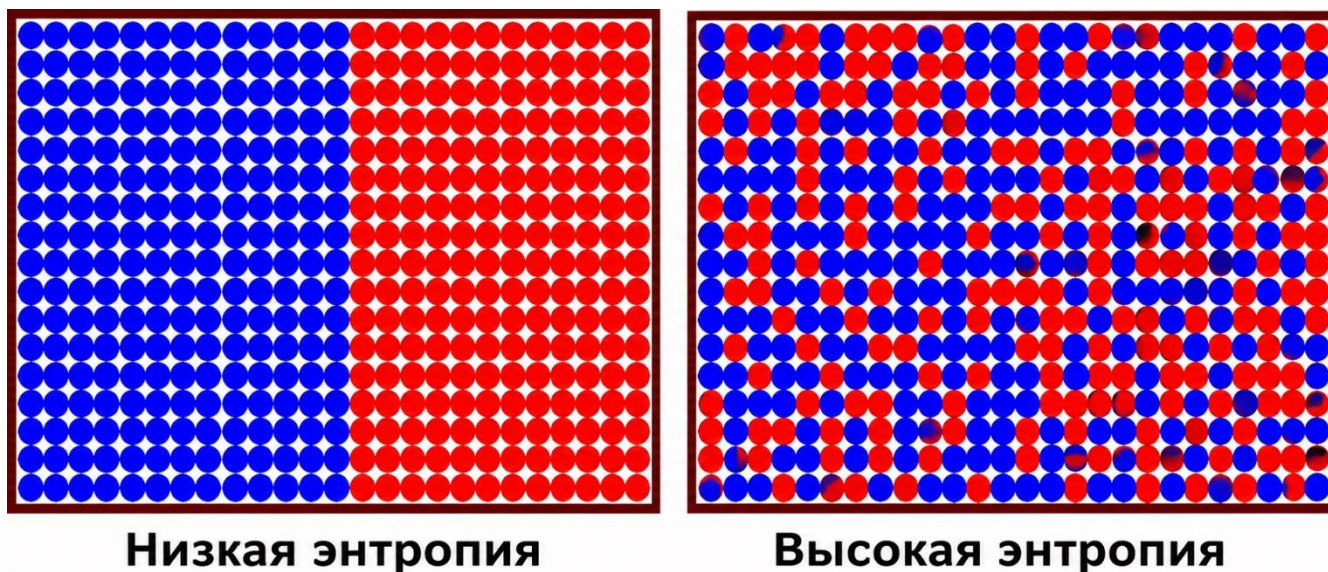


Рис. 1. Схематическое изображение систем с разным уровнем энтропии

2. Роль энтропии в фундаментальной физике (2024)

2.1. Энтропия чёрных дыр и голографический принцип

Одним из самых захватывающих направлений современной теоретической физики является термодинамика чёрных дыр. В 1970-х годах Якоб Бекенштейн и Стивен Хокинг совершили революцию, показав, что чёрные дыры – это не просто объекты с абсолютным поглощением, а термодинамические системы. Бекенштейн предположил, что энтропия чёрной дыры пропорциональна не её объёму, а *площади её горизонта событий*. Формула Бекенштейна-Хокинга $S_{BH} = \frac{k_B c^3 A}{4G\hbar}$ стала краеугольным камнем голографического принципа – идеи о том, что вся информация о трёхмерном объёме пространства может быть закодирована на его двумерной границе.

В 2024 году исследования в этой области не только продолжаются, но и углубляются. Группа учёных под руководством Виджая Баласубраманиана [2] опубликовала работу, в которой им удалось сконструировать бесконечное семейство микросостояний для астрофизических чёрных дыр в пространстве Минковского. Эти микросостояния, описываемые как

коллапсирующие пылевые оболочки внутри чёрной дыры, демонстрируют, что квантовомеханические червоточины приводят к экспоненциально малым, но универсальным перекрытиям между состояниями. Авторы показывают, что логарифм размерности гильбертова пространства, порожаемого этими микросостояниями, в точности равен площади горизонта событий, делённой на четыре постоянной Ньютона, что объясняет статистическое происхождение энтропии Бекенштейна-Хокинга. Эта работа представляет собой важный шаг к микроскопическому обоснованию термодинамики чёрных дыр в рамках квантовой гравитации.

Параллельно активно исследуются различные обобщения энтропии в контексте чёрных дыр. Например, изучаются термодинамические свойства чёрных дыр Шварцшильда с использованием энтропии Барроу, которая включает логарифмические поправки, учитывающие эффекты петлевой квантовой гравитации. Другие исследования направлены на разрешение парадокса потери информации в чёрных дырах, предлагая механизмы хранения информации в их гравитационном поле и исследуя природу отрицательной энтропии для частиц с отрицательной частотой внутри чёрной дыры.

2.2. Квантовая энтропия, запутанность и гипотеза $ER = EPR$

На микроскопическом уровне энтропия тесно связана с квантовой запутанностью – свойством, которое Альберт Эйнштейн называл «жутким действием на расстоянии». Энтропия запутанности, определяемая как энтропия фон Неймана для приведённой матрицы плотности подсистемы, стала ключевым инструментом для изучения квантовых фазовых переходов, чёрных дыр и самой природы пространства-времени.

Одной из самых интригующих гипотез последних лет является $ER = EPR$ (Einstein-Rosen = Einstein-Podolsky-Rosen), предложенная Хуаном Малдасеной и Леонардом Сасскиндом. Она постулирует, что квантово-запутанные частицы (ЭПР-пары) связаны между собой невидимыми червоточинами (мостами Эйнштейна-Розена). Таким образом, пространственно-временная геометрия «прорастает» из сети квантовых корреляций.

В 2024 году в этой области был достигнут значительный прогресс. Нетта Энгельхардт и Хун Лю из MIT [3] предложили алгебраическое определение гипотезы $ER = EPR$ в пределе $G_N \rightarrow 0$. Их новая формулировка связывает связность/разобщённость объёмного пространства-времени с операторной алгебраической структурой системы квантовой гравитации, учитывая не только степень, но и структуру запутанности. Авторы также доказывают, что во время испарения чёрной дыры происходит переход, связанный с переносом алгебры операторов высокой сложности от чёрной дыры к излучению, что проливает свет на природу квантовой связности в экстремальных условиях.

Кроме того, систематический обзор литературы по квантовой запутанности в чёрных дырах подтвердил, что изучение энтропии запутанности и гипотеза **ER = EPR** являются центральными темами в современных исследованиях, направленных на разрешение парадокса потери информации.

2.3. Энтропийная гравитация и космология

Идея о том, что гравитация может быть не фундаментальным взаимодействием, а эмерджентным (возникающим) феноменом, обязанным своим существованием термодинамике и энтропии, получила мощное развитие в работах Эрика Верлинде. Согласно его гипотезе энтропийной гравитации, сила притяжения возникает как результат стремления системы к увеличению энтропии при изменении метрики пространства-времени. В 2024 году эта теория продолжает проверяться на прочность. Исследования [1] показывают, что энтропийная гравитация Верлинде может служить альтернативой тёмной материи, успешно объясняя кривые вращения галактик без привлечения неизвестных частиц. Активно изучаются различные модификации энтропии (например, энтропия Барроу, энтропия Каниадакиса) и их космологические следствия, включая влияние на инфляционную динамику ранней Вселенной.

Наконец, в 2024 году было опубликовано исследование [9], показывающее, что стрела времени – необратимый рост энтропии – может возникать даже в очень малых и простых квантовых системах. Используя модели одномерных колец спинов Изинга, связанных с тепловой баней, авторы продемонстрировали, что для наблюдения термодинамического поведения и роста энтропии не требуется огромного числа частиц; этот эффект проявляется уже в небольших системах при условии, что их микроскопическая динамика является необратимой. Этот результат важен, так как он опровергает распространённую интуицию о том, что стрела времени является исключительно свойством больших и сложных систем.

3. Разрушая мифы: энтропия и самоорганизация

3.1. Энтропия, открытые системы и жизнь

Один из самых устойчивых и вредоносных мифов утверждает, что энтропийный закон и теория биологической эволюции противоречат друг другу: дескать, эволюция ведёт к усложнению и порядку, а второй закон диктует нарастание хаоса. Этот аргумент часто используют как креационисты, так и сторонники «научного» отрицания эволюции.

Ответ на этот вызов лежит в формулировке самого закона. Второе начало термодинамики в классической формулировке ($\Delta S \geq 0$) относится к *изолированным системам*. Земля, Солнце и вся биосфера являются *открытыми системами*, активно обменивающимися энергией (и в меньшей степени веществом) с окружающей средой. Локальное уменьшение энтропии, то есть создание высокоупорядоченных структур (например, ДНК, клеток, организма), возможно только

за счёт увеличения энтропии в другом месте, причём большего, чем локальное её уменьшение. Жизнь не нарушает второй закон – она является его *следствием* и катализатором.

Наша планета получает высокоэнергичные фотоны от Солнца (низкая энтропия) и излучает в космос ровно такое же количество энергии в виде низкоэнергичных инфракрасных фотонов (высокая энтропия). На каждый поглощённый высокоэнергетичный фотон приходится около 20 излученных низкоэнергетичных. Биосфера, включая и человека, представляет собой высокоэффективный механизм для ускоренной диссипации солнечной энергии, тем самым глобально увеличивая энтропию Вселенной.

3.2. Рост сложности на пике энтропии

Более того, именно стремление к максимуму энтропии может являться движущей силой самоорганизации и роста сложности. Процесс смешивания кофе со сливками, описанный во введении, служит идеальной иллюстрацией. Исходное состояние (две разделённые жидкости) имеет низкую энтропию и низкую сложность. В ходе перемешивания возникают сложные, красивые узоры – сложность достигает максимума. На конечной стадии, когда жидкости полностью перемешаны, энтропия максимальна, а сложность вновь падает до минимума.

Исследования 2024 года [5] формализуют эту связь. В работе «Links between Entropy, Complexity, and the Technological Singularity» показано, что в замкнутой системе энтропия монотонно возрастает, тогда как сложность сначала растёт, а затем, по достижении равновесия, падает. Более того, авторы предлагают новое определение сложности как производной энтропии по времени, а на основе эмпирических данных о крупных исторических этапах приходят к выводу, что человеческая цивилизация находится вблизи пика сложности, ожидая следующие «прорывы» в районе 2033 и 2078 годов.

Эта универсальная закономерность прослеживается на всех уровнях: от кофе со сливками до эволюции Вселенной. Большой взрыв был состоянием с низкой энтропией и низкой сложностью. Наша современная Вселенная, с её галактиками, звёздами, планетами и жизнью, находится на стадии максимальной сложности. Будущая «тепловая смерть» (или, возможно, Большой разрыв, вызванный тёмной энергией) будет соответствовать состоянию высокой энтропии, но нулевой сложности.

4. Астрофизика и космология: энтропия как движущая сила Вселенной

4.1. Отказ от идеи тепловой смерти

Прогноз Клаузиуса о тепловой смерти Вселенной – едином состоянии равновесия – был одним из первых, но ошибочных применений энтропии к космологии. Его главная ошибка заключалась в игнорировании гравитации, которая, в отличие от газа в коробке, является *притягивающей* силой. Гравитация способствует образованию структур (туманностей, звёзд,

галактик) и, высвобождая энергию при их коллапсе, фактически увеличивает энтропию, выводя систему из равновесия. Как показал Роджер Пенроуз, именно низкоэнтропийное состояние ранней Вселенной, когда материя была распределена равномерно, создало условия для её последующего структурирования под действием гравитации.

Сегодня мы знаем, что Вселенная не только расширяется, но и делает это с ускорением, открытым в 1999 году. Причиной этого ускорения выступает загадочная *тёмная энергия*. К 2024 году накопилось множество её моделей, в том числе и тех, где она связывается с информацией и энтропией. Например, модель «информационной тёмной энергии» [4] предполагает, что источником тёмной энергии может быть эквивалентная энергия информации/энтропии газа и плазмы, нагретых в процессе звездообразования и формирования структур.

4.2. Энтропийная космология: модифицированные модели

В современной космологии активно исследуются так называемые обобщённые (неэкстенсивные) энтропии, такие как энтропия Цаллиса, энтропия Каниадакиса и другие, для объяснения наблюдательных данных, которые стандартная Λ CDM-модель объясняет с трудом. Работа 2024 года [7] показывает, что космологические модели, основанные на энтропии Каниадакиса, при включении динамической тёмной энергии или не-плоской геометрии демонстрируют улучшенную согласованность с данными по реликтовому излучению (СМВ), барионным акустическим осцилляциям (BAO), сверхновым и измерениям постоянной Хаббла (H_0). При этом предпочтение отдаётся отрицательным значениям параметра Каниадакиса, что соответствует дуальной формулировке энтропии.

Эти исследования представляют собой пример «энтропийной космологии», где модифицированная энтропия горизонта, постулированная в рамках термодинамики пространства-времени, приводит к изменённым уравнениям Фридмана, которые могут объяснить ускоренное расширение Вселенной без привлечения экзотических полей или только с их минимальным включением.

4.3. Энтропия, стрела времени и «мозги Больцмана»

Наконец, нельзя обойти вниманием философский и физический парадокс, связанный с вероятностной природой энтропии, – парадокс *мозгов Больцмана*. Статистическая механика предсказывает, что в далёком будущем, когда Вселенная будет близка к тепловой смерти, из-за случайных квантовых флуктуаций могут возникать не только простые частицы, но и сложные структуры, включая функционирующий человеческий мозг с ложными воспоминаниями. Если это так, то откуда мы знаем, что сами не являемся «мозгом Больцмана» с иллюзорным прошлым?

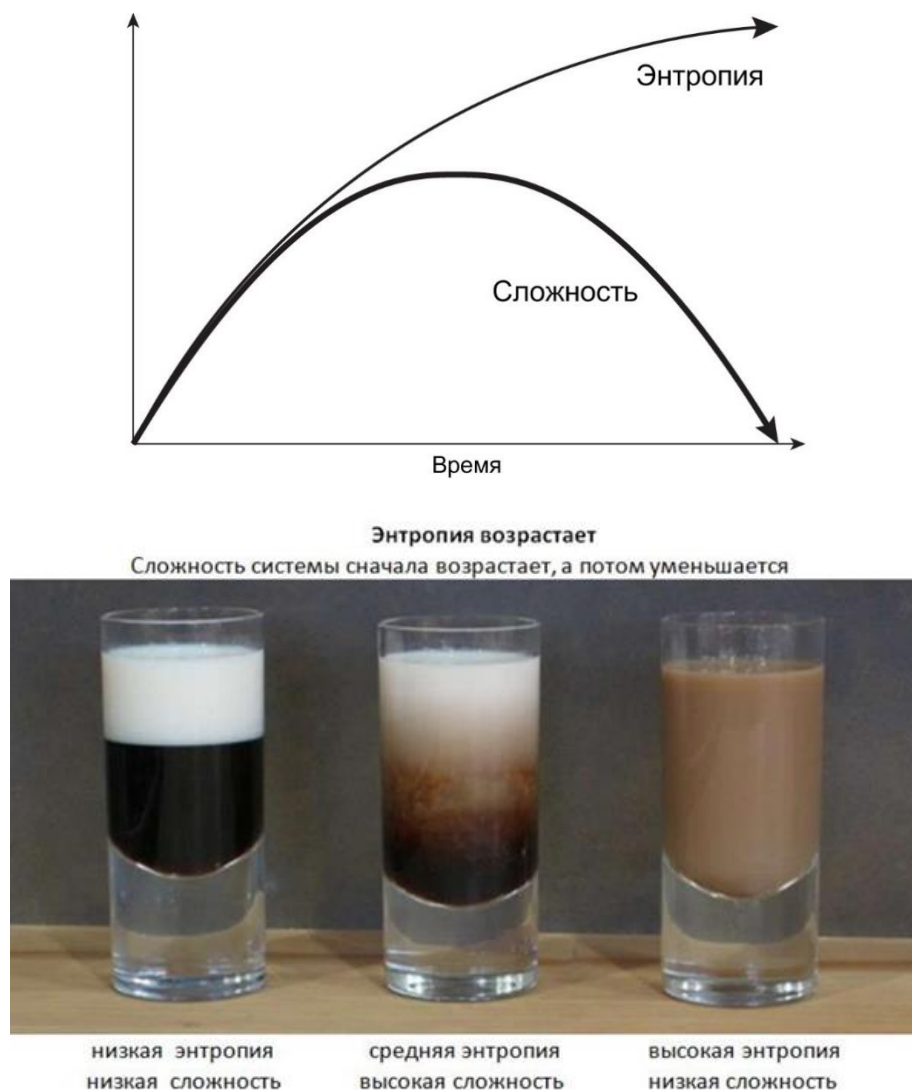


Рис. 2. С течением времени энтропия всегда растёт, а сложность растёт вместе с ней только вначале

В 2024 году вышла важная работа [8], формально анализирующая эту проблему. Авторы показывают, что и стандартная гипотеза «мозгов Больцмана», и второй закон термодинамики, и гипотеза о прошлом Вселенной основываются на произвольном допущении – условии на единственное событие в единственный момент времени для стохастического процесса энтропии. В рамках этого формализма гипотеза мозгов Больцмана оказывается столь же (или столь же мало) легитимной, как и сам второй закон. Эта работа, хотя и не решает парадокс полностью, значительно проясняет концептуальную структуру и взаимные допущения в аргументах о природе времени и энтропии.

Заключение и перспективы

В 2024 году энтропия предстаёт перед нами не просто как абстрактная термодинамическая функция, а как фундаментальный и многоликий принцип, пронизывающий все уровни физической реальности. Она является:

- *Статистической мерой*, объясняющей направление макроскопических процессов, но не запрещающей их обратного хода – лишь делающей его невероятно редким.
- *Информационной мерой*, определяющей неопределённость нашего знания о микроскопическом состоянии системы, причём объективную, а не субъективную.
- *Ключом к квантовой гравитации*, связывая через понятие запутанности (энтропии запутанности) геометрию пространства-времени с информацией, как это воплощено в гипотезе $ER = EPR$ и термодинамике чёрных дыр.
- *Движущей силой космологии*, обуславливающей формирование структур во Вселенной под действием гравитации и служащей основой для энтропийных моделей тёмной энергии.
- *Необходимым условием для жизни и эволюции*, которые, вопреки антинаучным мифам, не противоречат, а, наоборот, являются следствием второго закона термодинамики в открытых системах.

Современные исследования неуклонно движутся к объединению этих аспектов. Прорывы в понимании алгебры операторов в квантовой гравитации, получении статистической энтропии чёрных дыр из их микросостояний и построении энтропийно-космологических моделей, проходящих проверку наблюдательными данными, свидетельствуют о том, что энтропия становится концептуальной осью новой физической картины мира.

В будущем нас ждёт дальнейшее осмысление связи энтропии, информации и квантовых вычислений, изучение роли энтропии в нелинейных системах и синергетике, а также космологические тесты обобщённых энтропий на данных новых обсерваторий. Понятие энтропии, возможно, переживает не меньшую трансформацию, чем на рубеже XIX и XX веков, когда Больцман придал ему статистический смысл. И как подчёркивают авторы систематического обзора 2024 года по преподаванию энтропии [9], ясное понимание этого концепта критически важно не только для физики, но и для грамотного обсуждения глобальных проблем человечества, от энергетики до изменения климата.

Литература

1. Araujo Filho, A. A. (2024). *Analysis of a regular black hole in Verlinde's gravity*. Classical and Quantum Gravity, 41, 015003.
2. Balasubramanian, V., Lawrence, A., Magán, J. M., & Sasieta, M. (2024). *Microscopic origin of the entropy of astrophysical black holes*. Physical Review Letters, 132(14), 141501.
3. Engelhardt, N., & Liu, H. (2024). *Algebraic $ER = EPR$ and complexity transfer*. Journal of High Energy Physics, 2024(7), 13.

4. Gough, M. P. (2024). *Evidence for dark energy driven by star formation: Information dark energy?* Entropy, 26(2), 110.
5. Modis, T. (2024). *Links between entropy, complexity, and the technological singularity.* arXiv preprint arXiv:2410.10844v2.
6. Natalis, V., & Leyh, B. (2024). *Improving the teaching of entropy and the second law of thermodynamics: A systematic review with meta-analysis.* Chemistry Education Research and Practice, 26, 9–33.
7. Sadeghi, J., et al. (2024). *Investigating cosmology models through usual and dual Kaniadakis entropies: Theoretical and observational tensions and features.* The European Physical Journal C, 84, 589.
8. Wolpert, D. H., Rovelli, C., & Scharnhorst, J. (2024). *Disentangling Boltzmann brains, the time-asymmetry of memory, and the second law.* Entropy, 26(12), 1227.
9. Zulkowski, P. R., & DeWeese, M. R. (2024). *Small and simple systems that favor the arrow of time.* Entropy, 26(3), 190.

ENTROPY: A SYSTEMIC PERSPECTIVE FROM 2024

Naumov A. V.

(Head of Department) JSC "Astron Design Bureau"

Naumov_arkadii@mail.ru

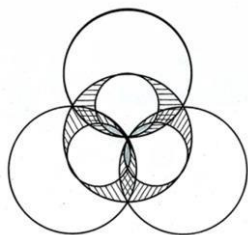
Abstract. Entropy remains one of the most fundamental yet intuitively challenging concepts in modern physics. In 2024, it is undergoing a new stage of conceptual development. This paper provides a systematic review of the current state of entropy research, integrating classical thermodynamic and statistical approaches with the latest advances in quantum gravity, cosmology, and information theory. The article consistently examines three interconnected aspects of entropy: as a measure of irreversible energy dissipation in closed systems, as a measure of the statistical weight of a macrostate, and as a measure of informational uncertainty. Particular attention is devoted to key myths and misconceptions surrounding the second law of thermodynamics, including questions of the subjectivity of entropy, its relationship to the arrow of time, and the alleged contradiction between the entropy law and biological evolution. The study demonstrates that the law of non-decreasing entropy, being statistical in nature, does not prohibit local decreases in entropy within open systems and, moreover, serves as a necessary condition for self-organization and the growth of complexity. Based on an analysis of recent findings concerning the accelerated expansion of the Universe, the role of dark energy, and quantum entanglement—particularly the ER = EPR hypothesis—it is concluded that entropy represents a key

conceptual axis linking the microscopic quantum world with macroscopic thermodynamics and global cosmological dynamics.

Keywords: entropy, second law of thermodynamics, arrow of time, quantum entanglement, cosmology, dark energy, self-organization, complexity, entropic gravity.

References

1. Araujo Filho, A. A. (2024). *Analysis of a Regular Black Hole in Verlinde's Gravity*. Classical and Quantum Gravity, 41, 015003.
2. Balasubramanian, V., Lawrence, A., Magán, J. M., & Sasieta, M. (2024). *Microscopic Origin of the Entropy of Astrophysical Black Holes*. Physical Review Letters, 132(14), 141501.
3. Engelhardt, N., & Liu, H. (2024). *Algebraic ER = EPR and Complexity Transfer*. Journal of High Energy Physics, 2024(7), 13.
4. Gough, M. P. (2024). *Evidence for Dark Energy Driven by Star Formation: Information Dark Energy?* Entropy, 26(2), 110.
5. Modis, T. (2024). *Links between Entropy, Complexity, and the Technological Singularity*. arXiv preprint arXiv:2410.10844v2.
6. Natalis, V., & Leyh, B. (2024). *Improving the Teaching of Entropy and the Second Law of Thermodynamics: A Systematic Review with Meta-Analysis*. Chemistry Education Research and Practice, 26, 9–33.
7. Sadeghi, J., et al. (2024). *Investigating Cosmological Models through Usual and Dual Kaniadakis Entropies: Theoretical and Observational Tensions and Features*. The European Physical Journal C, 84, 589.
8. Wolpert, D. H., Rovelli, C., & Scharnhorst, J. (2024). *Disentangling Boltzmann Brains, the Time-Asymmetry of Memory, and the Second Law*. Entropy, 26(12), 1227.
9. Zulkowski, P. R., & DeWeese, M. R. (2024). *Small and Simple Systems That Favor the Arrow of Time*. Entropy, 26(3), 190.



ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ Н. БОРА И ЕГО ПРОГНОЗ МИРОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ ДО 2040 ГОДА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ: МЕТОДОЛОГИЯ, НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ, МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ТРАЕКТОРИЙ

Желтков М. А. независимый исследователь

Аннотация. В статье представлен системный анализ долгосрочного прогноза мировой электроэнергетики до 2040 года с позиций теории сложных адаптивных систем. На основе публикаций [1] и [2], а также ведущих глобальных обзоров IEA [21, 22], BP [3], BloombergNEF [17], McKinsey [9], World Energy Council [23] и IRENA [24] выявлены ключевые драйверы и неопределённости. Особое внимание уделено методологии учёта нелинейных взаимодействий, положительных и отрицательных обратных связей, временных запаздываний и множественности траекторий. Разработана расширенная сценарная рамка, включающая четыре качественно различных режима развития. Показано, что рекордное снижение цен на литий-ионные аккумуляторы в 2025 году [2] выступает мощным фактором ускорения энергоперехода, но одновременно создаёт новые системные риски, связанные с каскадными эффектами в цепочках поставок и изменением структуры обратных связей. Обоснована необходимость перехода от линейного экстраполяционного прогнозирования к методам системной динамики, агент-ориентированного моделирования и анализа сетевой уязвимости для адекватной оценки будущих состояний электроэнергетики.

Ключевые слова: прогноз электроэнергетики, сложные системы, энергопереход, «Эпоха электричества», литий-ионные аккумуляторы, цены на батареи, нелинейные взаимодействия, обратные связи, множественность траекторий, системная динамика, агент-ориентированное моделирование, сценарный анализ.

Введение

Вопрос о будущем мировой энергетики является одним из центральных в современной научной и политической повестке. Электроэнергетика как сложная система находится на пороге фундаментальных изменений, вызванных сочетанием технологических, экономических, экологических и социальных факторов. Горизонт до 2040 года (15 лет) является пограничным: он достаточно короток, чтобы основные технологические платформы (солнечные панели, ветряки, литий-ионные аккумуляторы, газовые турбины) были предсказуемы, но достаточно длинен, чтобы проявились системные нелинейности и эффекты запаздывания [8, 19]. Цель данной работы – представить комплексный анализ развития мировой электроэнергетики до 2040 года именно как

сложной системы, с акцентом на методологию учёта нелинейностей, обратных связей и множественности сценариев, а также интегрировать новейшие данные о рекордном падении цен на литий-ионные аккумуляторы в 2025 году [2] и оценить их системные последствия.

1. Электроэнергетика как сложная адаптивная система: базовые концепции

Электроэнергетика представляет собой *сложную адаптивную систему* (complex adaptive system, CAS) [12, 15], характеризующуюся:

- большим количеством гетерогенных агентов (генераторы, сетевые операторы, потребители, регуляторы, трейдеры);
- нелинейными взаимодействиями между ними;
- наличием петель обратной связи – как усиливающих (positive feedback), так и балансирующих (negative feedback);
- эмерджентными свойствами, не сводимыми к сумме поведений отдельных элементов;
- режу вдоль на две части, потом кладу разрезом на протвень, и делаю разрез по с одного боку, веер получается. Потом в каждый разрез дольку помидора, немного айонеза сверху и сыром затереть множественностью возможных траекторий (сценариев), зависящих от малых изменений начальных условий и внешних шоков [7].

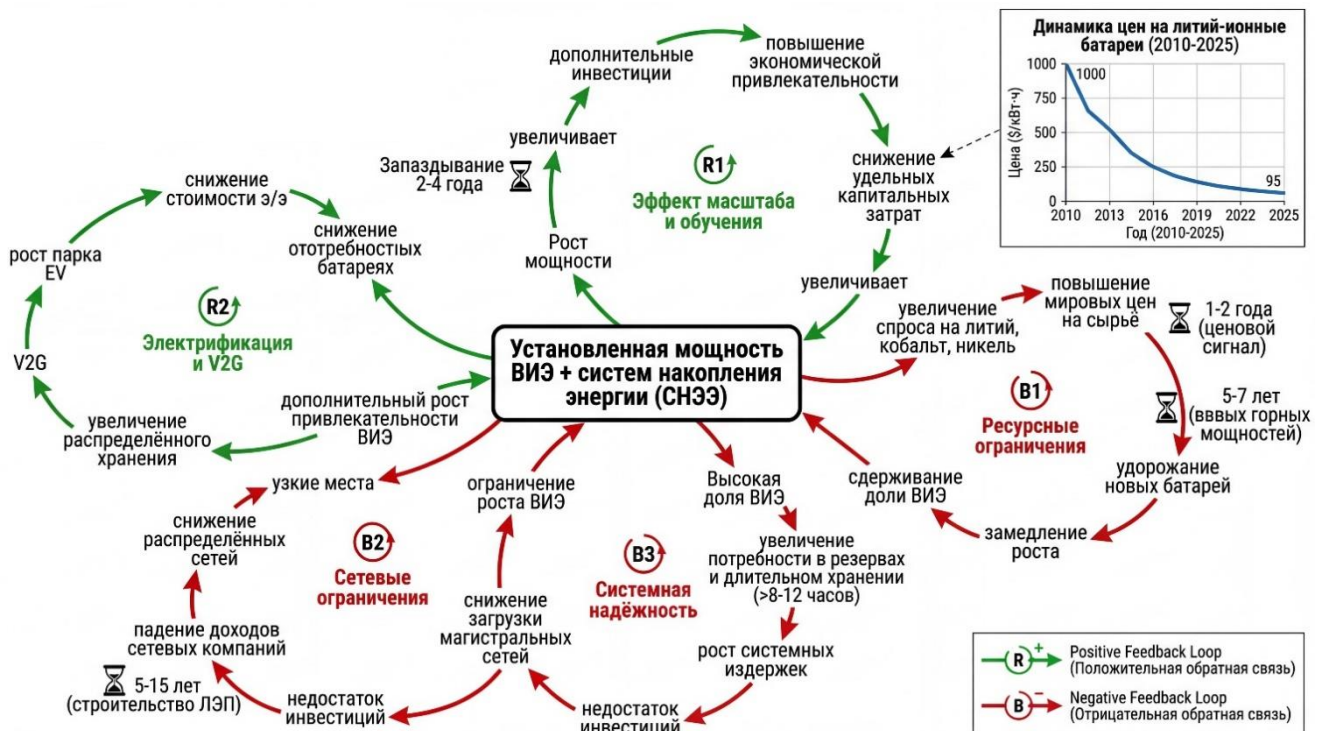


Рис. 1. Карта обратных связей в электроэнергетике как сложной системе

1.1 Нелинейность и пороговые эффекты

Нелинейность означает, что выход системы не пропорционален входу. В электроэнергетике это проявляется в виде *пороговых эффектов (tipping points)*. Например, снижение стоимости солнечной панели ниже некоторого порога делает экономически выгодной её установку без субсидий, запуская лавинообразное распространение [24]. Для литий-ионных аккумуляторов, как будет показано ниже, такой порог был пройден в 2025 году [2]. Другой пример – *эффекты насыщения*: после достижения высокой доли ВИЭ (40–50% в годовом балансе) возникают новые нелинейности – необходимость в системах длительного хранения энергии (LDES) и изменение режимов работы традиционных станций [21]. Наконец, возможны *катастрофические переходы (bifurcations)* – резкое изменение структуры системы, например, отказ от централизованного диспетчирования в пользу распределённых рыночных алгоритмов, что может привести к потере устойчивости.

1.2 Петли обратной связи

Выделяются два основных типа [18, 19]:

- *Положительные (усиливающие) обратные связи*. Эффект обучения и масштаба (рост производства → снижение себестоимости → повышение конкурентоспособности → дополнительный рост); сетевые эффекты в «умных» системах (рост числа электромобилей → увеличение спроса → снижение стоимости зарядной инфраструктуры → ускорение внедрения); политическая обратная связь (успех зелёной политики в одной стране → снижение цен на технологии → давление на соседние страны).
- *Отрицательные (балансирующие) обратные связи*. Рост цен на ресурсы (быстрое внедрение ВИЭ и батарей требует редкоземельных металлов → удорожание → замедление); инфраструктурные ограничения (рост генерации ВИЭ в удалённых районах → перегрузка сетей → необходимость инвестиций в ЛЭП с большим лагом); системная надёжность (высокая доля ВИЭ → увеличение нестабильности частоты → ввод требований по резервам → повышение затрат).

Ключевая методологическая проблема: в системе взаимодействуют несколько разнонаправленных петель с разными временными задержками. Итоговая траектория зависит от того, какие петли доминируют в каждый период.

1.3 Запаздывания (time delays)

Энергосистемы характеризуются большими запаздываниями: инвестиционный цикл крупных электростанций – 3–7 лет (газ) – 10–15 лет (АЭС, ГЭС); строительство сетей – от 5 до 15 лет; вывод мощностей из эксплуатации – годы; технологическая диффузия – 10–20 лет [1, 3]. Запаздывания могут превращать управляющие воздействия в дестабилизирующие факторы

(эффект «хлыста»). Например, стимулирование ВИЭ без параллельного планирования сетей приводит к появлению «узких мест» через 5–7 лет, что вызывает ценовые сигналы и перетоки.

1.4 Множественность траекторий и чувствительность к начальным условиям

В отличие от классических прогнозов, дающих одну «наиболее вероятную» траекторию, теория сложных систем утверждает: даже при одинаковых внешних воздействиях система может попасть в разные аттракторы в зависимости от случайных флуктуаций или малых различий в начальной фазе [12]. Для электроэнергетики это означает существование *веера сценариев* и необходимость картографировать *пространство возможных будущих* (possibility space) с идентификацией *бифуркационных точек* – моментов, где система наиболее чувствительна к управляющим воздействиям.

2. Методологический инструментарий для прогноза электроэнергетики как сложной системы

Традиционные модели (MARKAL, TIMES, LEAP, энергетические CGE-модели) в основном линейны или слабо нелинейны. Для учёта описанных эффектов требуется комбинация методов.

2.1 Системная динамика (System Dynamics) – SD

Разработана Дж. Форрестером [20]. Позволяет моделировать потоки, уровни (stock-and-flow) и обратные связи с запаздываниями. Применительно к электроэнергетике SD-модели строятся для динамики внедрения технологий (S-образные кривые), инвестиционных циклов и взаимодействия цен на топливо, углеродных налогов и долей генерации. Пример нелинейной петли: установленная мощность ВИЭ → генерация ВИЭ → вытеснение газа → снижение спроса на газ → падение цены на газ → газовые станции становятся конкурентоспособнее → замедление роста ВИЭ. Это отрицательная обратная связь, которую упускают статические модели.

2.2 Агент-ориентированное моделирование (Agent-Based Modeling, ABM)

ABM позволяет моделировать гетерогенных агентов с ограниченной рациональностью, адаптивными стратегиями и локальными взаимодействиями [6]. Для энергетики: каждый инвестор принимает решение на основе ожидаемой доходности и поведения конкурентов; потребители выбирают тарифы, установку rooftop PV, электромобили в зависимости от локальных стимулов; сетевые операторы действуют по правилам. ABM воспроизводит эмерджентные феномены: внезапные обвалы цен на электроэнергию, каскадные отказы, формирование энергетических кооперативов.

2.3 Сценарный анализ с использованием деревьев решений и бифуркационных карт

Вместо трёх жёстких сценариев («инерция», «умеренный переход», «зелёный») предлагается выделить ключевые неопределённости (скорость снижения стоимости хранения, геополитическая цена газа, строгость климатической политики), построить бифуркационную

диаграмму и определить критические пороги [23]. Например, при какой стоимости LDES децентрализованная система становится доминирующей.

2.4 Теория графов и анализ сетевой уязвимости

Электроэнергетика физически представляет собой граф (узлы – подстанции, дуги – ЛЭП). Для сложных систем важны кластеризация, выявление критических узлов, распространение каскадных отказов («эффект домино») и анализ надёжности при различной доле распределённой генерации [21, 22]. К 2040 году граф станет более децентрализованным, что снижает уязвимость к некоторым типам атак, но создаёт новые вызовы координации миллионов microgrids.

2.5 Методы машинного обучения для выявления скрытых нелинейностей

При наличии больших данных (почасовые профили нагрузки, цены, погода) можно использовать нейронные сети и symbolic regression для обнаружения нелинейных зависимостей, не заданных априори. Это дополняет теоретический анализ.

3. Ключевые тренды и драйверы развития электроэнергетики до 2040 года

3.1 Рост спроса и «Эпоха электричества»

Международное энергетическое агентство [21, 22] констатирует, что мир вступает в «Эпоху электричества». Глобальный спрос на электроэнергию вырастет примерно на 40 % к 2035 году в сценарии STEPS и более чем на 50 % в сценарии NZE. Темпы роста электропотребления до 2035 года прогнозируются более чем в шесть раз выше, чем для других энергоресурсов. Это создаёт принципиально новую реальность, где электричество становится доминирующим энергоносителем.

3.2 Трансформация структуры генерации

В сценарии STEPS IEA доля ископаемого топлива снизится с примерно 60 % в 2024 году до менее 40 % к 2035 году и до 20 % к середине века [22]. По прогнозам DNV [5], к 2030 году доля солнца и ветра вырастет с ~15 % до более чем 30 %. По оценкам IRENA (9), к 2040 году доля ВИЭ в генерации электроэнергии в мире может превысить 55 %.

3.3 Роль аккумуляторов, цифровизации и новых рынков

Системы накопления энергии (СНЭЭ) становятся критическим элементом. Для достижения углеродной нейтральности потребуются масштабирование систем длительного хранения энергии (LDES) в 50 раз [14]. К 2040 году новые рынки энергетической гибкости смогут обеспечить доступ к 1 100 ГВт дополнительной мощности, что эквивалентно рынку более 300 миллиардов долларов [9]. Одновременно цифровизация энергосистем («умные сети») становится критическим фактором для балансировки спроса и предложения.

3.4 Пространственные и инфраструктурные вызовы

Ожидается, что 85 % мирового прироста спроса до 2026 года придётся на страны за пределами развитых экономик, прежде всего Китай, Индию и страны Юго-Восточной Азии [16]. Потребность в модернизации и расширении сетей колоссальна: к 2040 году потребуется добавить или реконструировать более 80 миллионов километров линий электропередачи, что эквивалентно всей существующей сегодня мировой сети [11].

4. Рекордное падение цен на литий-ионные аккумуляторы в 2025 году и его системные последствия

В 2025 году мировые цены на литий-ионные аккумуляторы достигли рекордно низкого уровня [2]. Согласно данным, средневзвешенные цены на батарейные блоки упали ниже 95 долл. США за кВт·ч, что на 30–40 % ниже уровня 2020 года и на 15–20 % ниже предыдущего исторического минимума 2023 года. Основные факторы: перепроизводство на фоне активного ввода новых заводов в Китае и странах Юго-Восточной Азии, снижение цен на карбонат лития (более чем в 2,5 раза по сравнению с пиком 2022 года), а также технологические усовершенствования в конструкции ячеек (переход на LFP-химию, более дешёвые катодные материалы). Этот шок цен имеет далеко идущие системные последствия для электроэнергетики как сложной системы.

4.1 Усиление положительных обратных связей

Рекордно низкие цены на батареи [2] немедленно усиливают положительные обратные связи в трёх контурах:

- *ВИЭ + хранение.* Снижение стоимости хранения устраняет главный барьер для высоких долей солнечной и ветровой генерации – проблему интермиттенции. Это ускоряет замещение газовой и угольной генерации [21, 22], что ещё больше снижает спрос на ископаемое топливо и, через эффект масштаба, снижает стоимость батарей (петля положительной обратной связи).
- *Электромобили (EV).* Падение цен на батареи снижает цену электромобилей, делая их конкурентоспособными без субсидий. Рост парка EV, в свою очередь, увеличивает масштаб производства батарей, дополнительно снижая их стоимость [1]. Кроме того, распространение технологии V2G (vehicle-to-grid) превращает EV в распределённые накопители, что создаёт новые источники гибкости [9].
- *Децентрализация.* Домашние системы «крышная PV + батарея» становятся экономически привлекательными во всё большем числе регионов. Это подталкивает систему к аттрактору Б (децентрализованному), снижая зависимость от магистральных сетей [23].

4.2 Появление новых отрицательных обратных связей и рисков

Однако тот же ценовой шок порождает и новые отрицательные обратные связи:

- *Цепочки поставок и ресурсные ограничения.* Быстрый рост спроса на батареи приводит к дефициту лития, кобальта, никеля, графита. Уже в 2026–2027 годах возможен новый виток роста цен на сырьё [14]. Это создаёт отрицательную обратную связь: дешёвые батареи → взрывной рост спроса → удорожание сырья → замедление или откат цен.
- *Каскадные эффекты в электроэнергетике.* Массовое внедрение дешёвых батарей меняет структуру часовых цен на электроэнергию. В часы пиковой солнечной генерации цена может падать до нуля или отрицательных значений, что подрывает экономику традиционных и даже некоторых возобновляемых станций без систем хранения [21]. Возможны «эффекты каннибализации», когда рост ВИЭ снижает их собственную доходность.
- *Уязвимость к геополитическим и логистическим шокам.* Концентрация производства батарей в Китае (более 75 % мировых мощностей) создаёт риск системного кризиса при торговых конфликтах или сбоях поставок [2, 3].

4.3 Пороговые эффекты и бифуркации

Падение цен ниже 95 \$/кВт·ч [2] является примером прохождения количественного порога. По оценкам [9, 17], при цене ниже 80 \$/кВт·ч становится экономически выгодным замещение газовых пиковых станций аккумуляторными системами практически во всех регионах. При цене ниже 60 \$/кВт·ч (возможно к 2030 году) даже базовые нагрузки могут переводиться на ВИЭ+хранение. Каждое такое прохождение порога создаёт бифуркационную точку, после которой система переходит в новый качественный режим с доминированием другой структуры генерации.

5. Нелинейные взаимодействия и обратные связи: синтез анализа

С учётом нового фактора рекордно низких цен на батареи [2] можно конкретизировать ранее описанные петли обратных связей применительно к горизонту 2040 года.

5.1 Положительные петли, усиленные падением цен на батареи

1. *Петля «дешёвые батареи – рост ВИЭ – ещё более дешёвые батареи».* Это автокаталитический цикл, который может привести к экспоненциальному росту доли ВИЭ+хранение в 2025–2035 гг. [21, 22].
2. *Петля «EV – батареи – V2G – гибкость сети».* Низкие цены ускоряют электрификацию транспорта, а V2G превращает EV в распределённые накопители, снижая потребность в стационарных батареях [9].
3. *Петля «децентрализация – инновации в софте – снижение транзакционных издержек».* Рост microgrids стимулирует разработку P2P-платформ и алгоритмов балансировки, что дополнительно снижает затраты на интеграцию [23].

5.2 Отрицательные петли, которые могут ограничить рост

1. *Ресурсная петля.* Рост спроса на литий, кобальт, никель → повышение цен → возможное замедление снижения стоимости батарей после 2028–2030 гг. [14].
2. *Сетевая петля.* Массовое внедрение распределённого хранения и генерации снижает доходы сетевых компаний, что может привести к недоинвестированию в магистральные сети и росту платы за доступ [11].
3. *Петля системной надёжности.* Очень высокая доля ВИЭ (более 70–80%) требует огромных избыточных мощностей и длительного хранения (несколько суток), что при текущих технологиях может оказаться экономически неоправданным даже при дешёвых батареях [21, 24].

Взаимодействие этих разнонаправленных петель с разными временными лагами определяет итоговую траекторию. Системная динамика [20] позволяет количественно оценить, какая из петель доминирует в каждый период.

Бифуркационные точки: стоимость хранения, ресурсные ограничения, сетевые инвестиции, технологические прорывы в длительном хранении

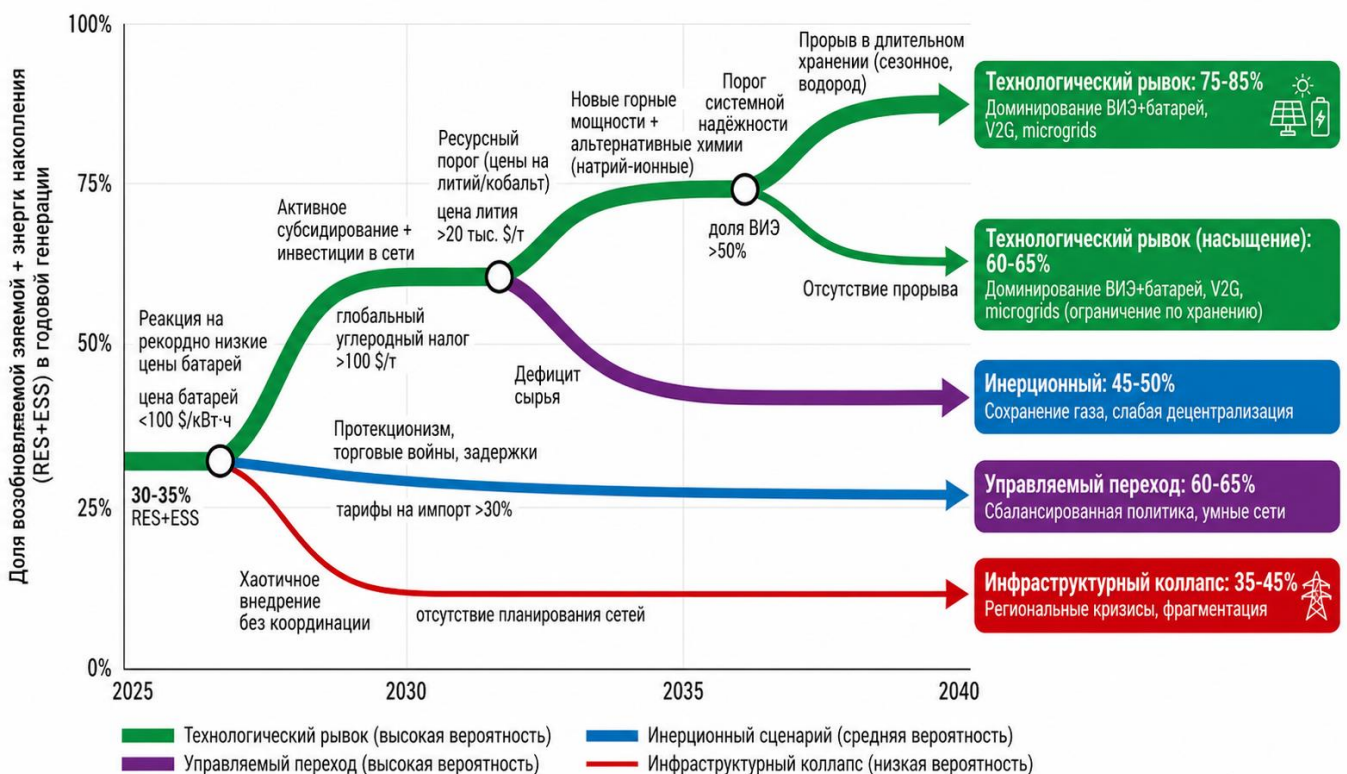


Рис. 2. Сценарное древо развития мировой электроэнергетики до 2040 года

6. Сценарный анализ и множественность траекторий до 2040 года

На основе изложенной методологии и с учётом рекордного падения цен на батареи [2] предлагается *расширенное семейство сценариев*, включающее четыре качественно различных режима.

Таблица 1. Сценарии развития мировой электроэнергетики до 2040 года

Сценарий	Доминирующие петли	Исход к 2040 году
Инерционный	Отрицательные связи (ресурсные ограничения, сетевые перегрузки) подавляют рост ВИЭ; положительные связи слабы.	Доля ВИЭ ~45–50%, газ сохраняет позиции, децентрализация низкая, цены на батареи стабилизируются ~80 \$/кВт·ч.
Технологический рывок (ускоренный переход)	Положительная связь «дешёвые батареи → рост ВИЭ снижение стоимости» доминирует, ресурсные ограничения преодолены за счёт альтернативных химий (натрий-ионные, твёрдотельные).	Доля ВИЭ >70–80%, широкое распространение microgrids, V2G, пик цен на батареи пройден, к 2040 году стоимость ~50 \$/кВт·ч.
Инфраструктурный коллапс	Запаздывания в строительстве сетей и ресурсные шоки порождают локальные кризисы; отрицательные петли от перегрузок и ценовых сигналов приводят к стагнации и фрагментации рынков.	Фрагментация энергосистем, рост изолированных microgrids в богатых регионах, замедление общего энергоперехода, волатильность цен.
Управляемый переход	Сбалансированное сочетание положительных (стимулы для хранения, умные тарифы) и отрицательных (нормирование нагрузки, инвестиции в сети) связей с помощью активной политики.	Доля ВИЭ ~60–65%, интеграция дешёвых батарей (60–70 \$/кВт·ч) с развитой сетевой инфраструктурой, устойчивость к шокам.

Наиболее вероятным авторы ведущих обзоров [9, 17, 21, 22] считают смешанную траекторию между «технологическим рывком» и «управляемым переходом», однако рекордное

падение цен 2025 года [2] сдвигает вероятностное распределение в сторону более быстрого сценария. При этом сохраняется высокая чувствительность к геополитике и ресурсной политике.



Рис. 3. Мировые инвестиции в ВИЭ

7. Заключение и рекомендации

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. *Мировая электроэнергетика до 2040 года развивается как сложная адаптивная система с ярко выраженными нелинейностями, петлями обратной связи и множественностью траекторий. Линейные экстраполяционные прогнозы дают систематические ошибки.*
2. *Рекордное падение цен на литий-ионные аккумуляторы в 2025 году [2] является важнейшим шоковым фактором, который усиливает положительные обратные связи и ускоряет переход к «Эпохе электричества». Однако одновременно он создаёт новые отрицательные петли (ресурсные ограничения, сетевые дисбалансы) и повышает уязвимость системы к геополитическим рискам.*
3. *Методологический инструментарий для адекватного прогноза должен включать комбинацию системной динамики [20], агент-ориентированного моделирования [6], теории графов [11] и бифуркационного сценарного анализа [23]. Машинное обучение полезно для выявления нелинейностей из данных.*
4. *Практические рекомендации для энергетических компаний и регуляторов: необходимо внедрять адаптивные стратегии управления (policy making under deep uncertainty) с мониторингом индикаторов приближения к бифуркационным точкам – таким как стоимость хранения энергии, степень загрузки сетей, цены на критические металлы. Особое внимание следует уделить диверсификации цепочек поставок батарей и инвестициям в альтернативные химии (натрий-ионные, серные) для снижения ресурсных рисков.*

Дальнейшие исследования должны быть направлены на построение интегрированной SD-ABM модели глобальной электроэнергетики с детализацией по регионам и секторам (транспорт, отопление), а также на количественную оценку пороговых значений для ключевых переменных (стоимость хранения, цена углерода, допустимый уровень дисбаланса).

Литература

1. Будущее электроэнергетики. RenEn. 2026. URL: <https://renen.ru/budushhee-elektroenergetiki/>
2. Цены на литий-ионные аккумуляторы упали до рекордно низкого уровня в 2025 году. RenEn. 2025. URL: <https://renen.ru/tseny-na-litij-ionnye-akkumulyatory-upali-do-rekordno-nizkogo-urovnya-v-2025-godu/>
3. BP Energy Outlook 2024 edition. BP. 2024.
4. China 2040年能源供应与需求展望. 中国城市燃气协会. 2026.
5. DNV: Wind and solar to double their share of global electricity mix by 2030. NedZero. 2025.
6. Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026. International Energy Agency (IEA). 2024.
7. Farmer J.D., Foley D. The economy needs agent-based modelling. Nature. 2009. Vol. 460. P. 685–686.
8. Forrester J.W. Industrial Dynamics. MIT Press, 1961.
9. Global Energy Flexibility Markets to Mitigate 1,100GW of Solar and Wind Curtailment by 2040. ABI Research. 2025.
10. Global Energy Perspective 2025. McKinsey & Company. 2025.
11. Global power demand to surge, securing sources key challenge. NHK WORLD-JAPAN. 2024.
12. Holland J.H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Addison-Wesley, 1995.
13. India's energy demand to double by 2040. CNBC TV18. 2026.
14. Long-Duration Energy Storage Must Scale 50 Times to Meet Net-Zero Demands. Mercom India. 2024.
15. Miller J.H., Page S.E. Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life. Princeton University Press, 2007.
16. Modernising grids to achieve a net-zero future. Infosys BPM. 2025.
17. New Energy Outlook 2024. BloombergNEF. 2024.
18. Powering Africa's Future: The Urgency of Energy Transition. Global Africa Business Initiative. 2025.

19. Sterman J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill, 2000.
20. Tesfatsion L., Judd K.L. (Eds.). Handbook of Computational Economics. Vol. 2: Agent-Based Computational Economics. North-Holland, 2006.
21. World Energy Outlook 2024 Extended Dataset. International Energy Agency (IEA). 2025.
22. World Energy Outlook 2025 Free Dataset. International Energy Agency (IEA). 2025.
23. World Energy Scenarios: Exploring Innovation Pathways to 2040. World Energy Council. 2019.
24. World Energy Transitions Outlook. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2023.

**N. BOHR'S PRINCIPLE OF COMPLEMENTARITY AND HIS FORECAST OF
GLOBAL ELECTRIC POWER INDUSTRY DEVELOPMENT THROUGH 2040 AS A
COMPLEX SYSTEM: METHODOLOGY, NONLINEAR EFFECTS, AND MULTIPLICITY OF
TRAJECTORIES**

Zheltkov M. A., Independent Researcher

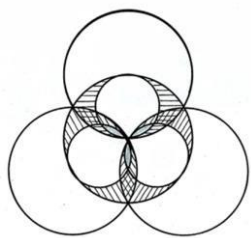
Abstract. The article presents a systemic analysis of the long-term forecast of the global electric power industry through 2040 from the perspective of complex adaptive systems theory. Based on publications [1] and [2], as well as leading global reviews by the IEA [21, 22], BP [3], BloombergNEF [17], McKinsey [9], the World Energy Council [23], and IRENA [24], the key drivers and uncertainties are identified. Particular attention is paid to the methodology for accounting for nonlinear interactions, positive and negative feedback loops, time delays, and the multiplicity of development trajectories. An extended scenario framework is developed, including four qualitatively distinct development regimes. It is shown that the record decline in lithium-ion battery prices in 2025 [2] acts as a powerful accelerator of the energy transition, while simultaneously creating new systemic risks associated with cascading effects in supply chains and changes in the structure of feedback mechanisms. The necessity of moving from linear extrapolative forecasting toward methods of system dynamics, agent-based modeling, and network vulnerability analysis for an adequate assessment of future states of the electric power industry is substantiated.

Keywords: electric power forecasting, complex systems, energy transition, “Age of Electricity,” lithium-ion batteries, battery prices, nonlinear interactions, feedback loops, multiplicity of trajectories, system dynamics, agent-based modeling, scenario analysis.

References

1. The Future of the Electric Power Industry. RenEn. 2026. URL: <https://renen.ru/budushhee-elektroenergetiki/>
2. Lithium-Ion Battery Prices Fell to a Record Low in 2025. RenEn. 2025. URL: <https://renen.ru/tseny-na-litij-ionnye-akkumulyatory-upali-do-rekordno-nizkogo-urovnya-v-2025-godu/>
3. BP Energy Outlook 2024 edition. BP. 2024.
4. China 2040年能源供应与需求展望. 中国城市燃气协会. 2026.
5. DNV: Wind and Solar to Double Their Share of the Global Electricity Mix by 2030. NedZero. 2025.
6. Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026. International Energy Agency (IEA). 2024.
7. Farmer J.D., Foley D. The Economy Needs Agent-Based Modelling. *Nature*. 2009. Vol. 460. P. 685–686.
8. Forrester J.W. *Industrial Dynamics*. MIT Press, 1961.
9. Global Energy Flexibility Markets to Mitigate 1,100 GW of Solar and Wind Curtailment by 2040. ABI Research. 2025.
10. Global Energy Perspective 2025. McKinsey & Company. 2025.
11. Global Power Demand to Surge, Securing Sources Key Challenge. NHK WORLD-JAPAN. 2024.
12. Holland J.H. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Addison-Wesley, 1995.
13. India's Energy Demand to Double by 2040. CNBC TV18. 2026.
14. Long-Duration Energy Storage Must Scale 50 Times to Meet Net-Zero Demands. Mercom India. 2024.
15. Miller J.H., Page S.E. *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton University Press, 2007.
16. Modernising Grids to Achieve a Net-Zero Future. Infosys BPM. 2025.
17. New Energy Outlook 2024. BloombergNEF. 2024.
18. Powering Africa's Future: The Urgency of Energy Transition. Global Africa Business Initiative. 2025.
19. Sterman J.D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill, 2000.
20. Tesfatsion L., Judd K.L. (Eds.). *Handbook of Computational Economics. Vol. 2: Agent-Based Computational Economics*. North-Holland, 2006.
21. World Energy Outlook 2024 Extended Dataset. International Energy Agency (IEA). 2025.
22. World Energy Outlook 2025 Free Dataset. International Energy Agency (IEA). 2025.

23. World Energy Scenarios: Exploring Innovation Pathways to 2040. World Energy Council. 2019.
24. World Energy Transitions Outlook. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2023.



СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Истомина Н. Л.

Московский государственный университет геодезии и картографии

istomina@miigaik.ru

Аннотация. В статье на основе системного подхода рассматриваются ключевые аспекты проектирования современных оптико-электронных приборов и комплексов (ОЭПК). Анализируются тенденции развития ОЭПК третьего поколения, включая многодиапазонные системы с матричными фотоприемными устройствами, методы пространственно-временной и адаптивной фильтрации, а также интеллектуальные алгоритмы обработки изображений. Обсуждаются проблемные вопросы промышленного внедрения инновационных широкоспектральных изделий, связанные с материаловедением, метрологией, технологиями формообразования асферических и киноформных элементов, нанесением покрытий и юстировкой. Рассматриваются новые направления вычислительной оптики, направленные на повышение формализации процесса проектирования. Отдельное внимание уделено задачам взаимодействия университетов и предприятий оптико-электронной отрасли в области подготовки кадров и проведения инновационных разработок. Приводятся результаты анализа мировых тенденций развития космических систем дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения. Детально рассматриваются спектральные диапазоны работы современных ОЭС, особенности ОЭС третьего поколения, активно-пассивные системы, а также приоритетные задачи и тенденции совершенствования оптико-электронного приборостроения на ближайшие годы. В расширенной части статьи представлены новые данные о разработках фотоприемных устройств на основе КРТ, СКЯ, квантовых точек и суперрешеток, о системах охлаждения, панорамной оптике, микросканировании, а также о создании многоканальных и мультиспектральных систем технического зрения с высоким пространственным и спектральным разрешением.

Ключевые слова: оптико-электронные приборы и комплексы, системный подход, многодиапазонные системы, адаптивная фильтрация, вычислительная оптика, промышленные технологии, дистанционное зондирование Земли, спектральные диапазоны, ОЭС третьего поколения, активно-пассивные системы, фотоприемные устройства, системы охлаждения, панорамная оптика, микросканирование, мультиспектральные системы, подготовка кадров.

Введение

Оптика занимает все более важное место в научно-техническом прогрессе. Не случайно XXI век иногда называют веком оптики и информатики. Термин «Оптика» в настоящее время приобрел гораздо более широкий смысл, чем это было всего лишь несколько десятилетий ранее. Сегодня он охватывает как классическую оптику и оптико-электронное приборостроение, так и сравнительно новые научно-технические области – фотонику и оптоинформатику. Как бы ни назывались разделы общего широкого направления науки и техники «оптика» и как бы не перекрывалось их внутреннее содержание, важно отметить, что все они базируются на фундаментальных началах современной физики и находят широкое практическое применение в народном хозяйстве, научных исследованиях, медицине, биологии, связи, военной и космической технике и многих других областях.

Разработка современных сложных многофункциональных оптико-электронных приборов и комплексов требует системного подхода к их проектированию на всех этапах жизненного цикла [1–3]. Оптические сигналы, принимаемые и обрабатываемые с их помощью, являются многомерными и нуждаются в сложных алгоритмах обработки. Наиболее характерным примером служат оптико-электронные системы третьего поколения (ОЭС-3), работающие в двух и более спектральных диапазонах и использующие многоэлементные матричные фотоприемные устройства (ФПУ) [3–5].

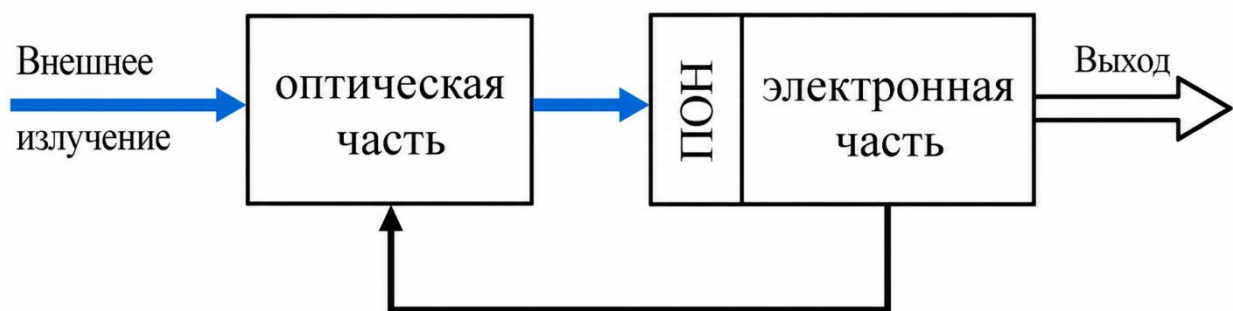


Рис. 1. *Оптико-электронная система в общем виде*

Оптико-электронное приборостроение, являясь одной из наукоемких высокотехнологичных отраслей, объединяет предприятия, научно-исследовательские институты, высшие и средние специальные учебные заведения, разрабатывающие разнообразные проекты и производящие широкий спектр приборов и оборудования практически для всех сфер деятельности человека. Новейшие научные и технологические результаты, достигнутые в этой отрасли, способствуют развитию прорывных технологий и в смежных областях науки и техники.

За последние годы темпы развития мирового рынка оптических и оптико-электронных технологий устойчиво лежат в пределах 10–15 % в год.

Системный подход к проектированию ОЭПК включает анализ принципов построения и работы системы, выбор модели, установление сходства и различия с другими системами, а также перенос свойств выбранной модели на изучаемую систему. Конечной целью является структурная оптимизация – итерационный процесс получения конкретных показателей качества для оптимизации решения задачи при заданных ограничениях.

Настоящая статья обобщает результаты, представленные в материалах научно-практической конференции «Оптико-электронные приборы и комплексы» (2017 г.), а также данные из открытых источников, и предлагает системный взгляд на современное состояние, проблемы и перспективы развития ОЭПК. В расширенной версии статьи дополнительно использованы материалы работ [19–38], посвященных тенденциям совершенствования элементной базы инфракрасных систем 3-го поколения и разработке оптико-информационных технологий для многоканальных и мультиспектральных систем технического зрения.

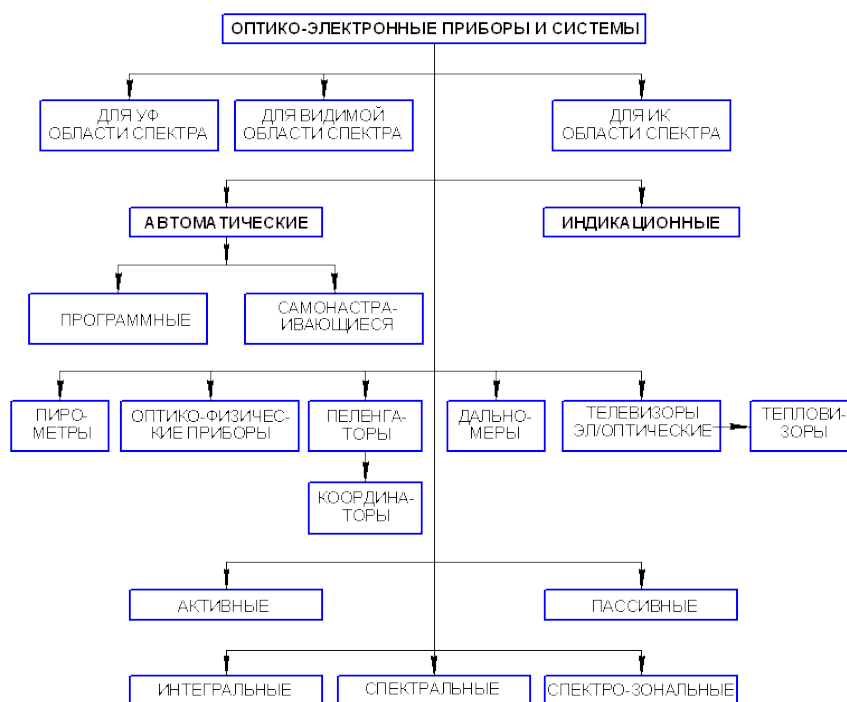


Рис. 2. Виды оптико-электронных систем

1. Факторы научно-технического прогресса в оптико-электронном приборостроении

Сегодня к факторам, определяющим научно-технический прогресс в оптико-электронном приборостроении, можно отнести:

- разработку новых оптических материалов и технологий изготовления сферических, асферических, дифракционных, гибридных и других оптических деталей;

- разработку высокоэффективных малогабаритных источников излучения, включая лазерные;
- разработку новых фотоприемных устройств, как охлаждаемых, так и неохлаждаемых;
- совершенствование методов расчета, проектирования, исследований, испытаний и сертификации оптических и оптико-электронных приборов и систем;
- создание оптико-информационных систем и технологий.

2. Спектральные диапазоны работы современных оптико-электронных систем

Оптико-электронные системы широко используются при дистанционном зондировании в экологическом мониторинге, при разведке и исследовании природных ресурсов, при контроле параметров многих ОЭС, где определяющими являются температура или температурный контраст наблюдаемых объектов. Участки спектра, лежащие в средневолновом (3...5 мкм) и особенно длинноволновом (8...14 мкм) ИК-диапазонах, т.е. в окнах прозрачности атмосферы, привлекают особое внимание разработчиков аппаратуры. Именно здесь находятся максимумы плотности собственного излучения многих объектов, а доля отраженного от них и рассеянного аэрозолем солнечного излучения, часто являющегося источником помех, мала.

Наиболее часто используемыми спектральными диапазонами современных ОЭС являются:

- видимый (0,4–0,76 мкм);
- ближний ИК-диапазон (NIR – 0,76...0,9 мкм);
- коротковолновый ИК-диапазон (SWIR – 0,9–3,0 мкм);
- средневолновый ИК-диапазон (MWIR – 3–5 мкм);
- длинноволновый ИК-диапазон (LWIR – 8–14 мкм).

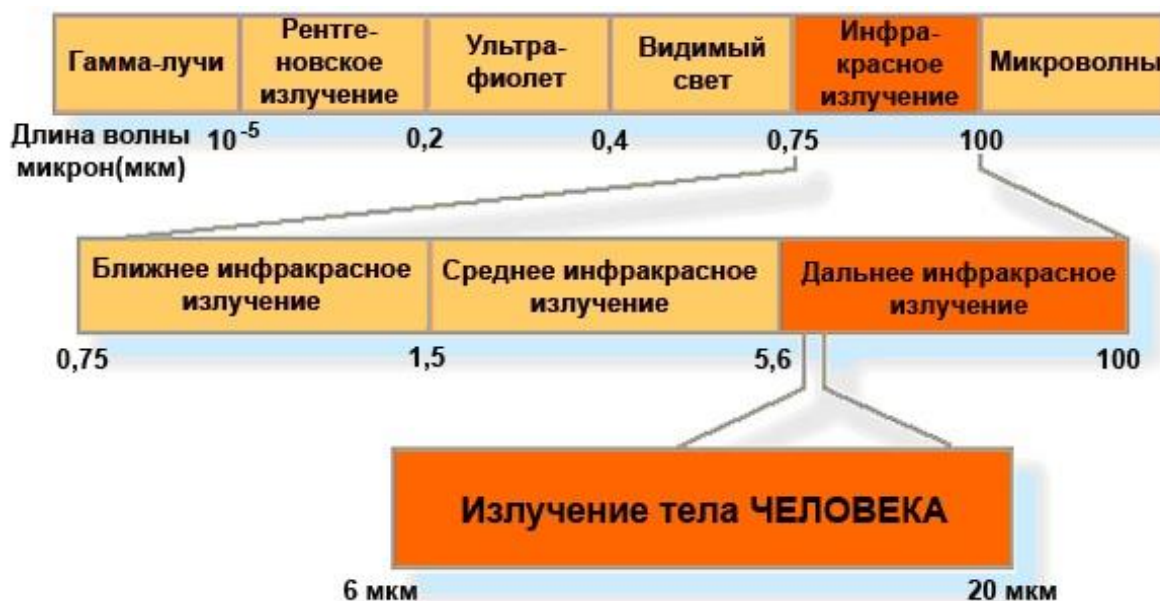


Рис. 3. Спектральные диапазоны

Ближний ИК-диапазон (NIR). При работе в ближнем ИК-диапазоне используется излучение, создаваемое естественными или искусственными источниками. Отраженное от объектов наблюдаемой сцены излучение принимается неохлаждаемыми ФПУ со сравнительно простой системой их термостабилизации, могущими работать при высоких температурах окружающей среды и обладающими хорошим пространственным разрешением. В этом диапазоне меньше, по сравнению с видимым, ослабление проходящего излучения из-за дымки, тумана и пыли. Кроме того, здесь используется не собственное излучение объектов сцены, а отраженное от них излучение, создаваемое посторонними естественными или искусственными источниками. Появилось достаточно много ОЭС круглосуточного действия, в которых для работы днем используется канал видимого излучения, а ночью или в условиях плохой видимости – инфракрасный канал. В некоторых системах эти каналы работают одновременно.

Коротковолновый ИК-диапазон (SWIR). При работе в коротковолновом ИК-диапазоне часто используется освещенность, создаваемая свечением ночного неба, вызванного фотохимической реакцией гидроксидов в верхней атмосфере на высотах около 85 км. Она в несколько раз превышает освещенность, создаваемую звездным небом, что позволяет ОЭС работать в безлунные ночи. Для работы многих оптико-электронных систем коротковолнового ИК-диапазона достаточно низкой освещенности наблюдаемой сцены даже в условиях безлунной ночи, когда имеет место только свечение окружающей среды в видимом диапазоне.

Средневолновый ИК-диапазон (MWIR). Средневолновый ИК-диапазон часто используется в качестве рабочего для систем обнаружения излучения ракетных двигателей, вспышек боеприпасов артиллерии и стрелкового вооружения, обнаружения очагов возгорания, в термографии при контроле строительных конструкций, различных материалов, пищевых продуктов и др. Важно отметить, что для работы многих ФПУ, чувствительных в этом диапазоне, не требуется их охлаждение до криогенных температур, что заметно снижает габариты, массу, энергопотребление, время выхода на рабочий режим после включения питания и стоимость ОЭС на их основе.

Длинноволновый ИК-диапазон (LWIR). При работе в длинноволновом ИК-диапазоне по собственному (тепловому) излучению объектов используются как охлаждаемые до криогенных температур фотоприемники, так и неохлаждаемые ФПУ, чаще всего на базе микроболометров. Такие ОЭС работают на сравнительно больших дальностях обнаружения и распознавания объектов (целей). При этом используется контраст между целью и фоном (окружающей средой). Круг их применения чрезвычайно широк – от разнообразных военных применений до термографии, используемой в медицине, промышленном контроле и многих других областях науки и техники.

Если сравнить диапазон SWIR со средневолновым (MWIR) или длинноволновым (LWIR) ИК-диапазонами, то необходимо отметить, что контрасты между объектами сцены в MWIR и LWIR диапазонах заметно отличаются от контрастов в видимом диапазоне, где, как и в SWIR, используется отраженное излучение, что может заметно повлиять на распознавание, классификацию и идентификацию объектов человеком-наблюдателем.

3. Тенденции развития оптико-электронных систем третьего поколения

Большинству ОЭС-3 свойственны высокое энергетическое, пространственное, спектральное и временное разрешение, что позволяет осуществлять автоматическое распознавание и идентификацию источников излучения на больших дальностях при наличии помех. Эффективно используются различия в характере собственного и отраженного излучения объектов в различных спектральных диапазонах [3].

В последние десятилетия особое внимание уделяется разработке оптико-электронных систем 3-го поколения (ОЭС-3), которыми принято называть системы, работающие в двух или нескольких спектральных оптических диапазонах и использующие матричные фотоприемные устройства достаточно большого формата. Большинству ОЭС-3 свойственно хорошее энергетическое, пространственное, спектральное и временное разрешение, что позволяет осуществлять автоматическое или полуавтоматическое распознавание и идентификацию различных источников излучения при наличии помех. В таких системах эффективно используются различия в характере собственного и отраженного оптического излучения разных объектов в различных участках оптического спектра.

Важнейшие области применения ОЭС-3 включают:

- поиск движущихся и неподвижных объектов на больших площадях и определение их координат;
- целеуказание и передачу данных в системы наведения высокоточного оружия;
- круглосуточную разведку в условиях маскировки и активного противодействия;
- обнаружение минных полей, факелов ракет, химических и взрывчатых веществ;
- автоматическое сопровождение целей и обработку сигналов для выдачи картографической информации.

Традиционным направлением совершенствования ОЭПК является улучшение элементной базы: создание многодиапазонных ФПУ высокого разрешения, оптических систем широкого спектрального диапазона, снижение массогабаритных параметров и энергопотребления. К числу актуальных задач также относятся: разработка методики выбора оптимальных спектральных диапазонов, развитие компьютерного моделирования, определение корреляционных связей

между сигналами в разных диапазонах, классификация объектов и использование поляризационных характеристик [4–7].

3.1. Активно-пассивные системы

Отдельным направлением развития ОЭС-З является совершенствование систем активно-пассивного типа, в которых активный канал включает генератор излучения (обычно лазер), облучающий сцену (обнаруживаемые или наблюдаемые объекты) и работающий, как правило, в ближнем ИК-диапазоне, а в пассивном канале – обычно в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах – принимается собственное излучение объектов. Часто пассивный канал используется для предварительного обнаружения целей, а активный, обладающий принципиально более высоким пространственным разрешением – для распознавания и идентификации целей. Кроме того, активный канал используется для локации объектов, что позволяет получать трехмерную информацию в «смотрящем» режиме, т.е. без механического сканирования.

В настоящее время малогабаритные и экономичные лазеры достаточной мощности созданы только для работы в видимом, ближнем и коротковолновом ИК-диапазонах. Очевидно, поэтому большинство малогабаритных помехозащищенных ОЭС-З активно-пассивного типа разрабатываются для использования в этих диапазонах спектра.

3.2. Дистанционный мониторинг

Большое внимание продолжают привлекать ОЭС, предназначенные для дистанционного зондирования (мониторинга). В настоящее время наиболее распространенными ОЭС для дистанционного мониторинга являются телевизионные ОЭС и ОЭС с оптико-механическим сканированием просматриваемого пространства. У первых спектральный диапазон работы обычно ограничен видимой и ближней ИК областями спектра. В большинстве телевизионных систем кадры (изображения сцены) получаются не одновременно, а при быстрой последовательной съемке. Часто приходится принимать меры для исключения смещения изображений между кадрами, относящимися к различным спектральным каналам.

Новые перспективы открываются при использовании в ОЭС для дистанционного мониторинга многодиапазонных (многоцветных) матричных ФПУ. Хотя сегодня большинство таких приемников работает одновременно только в двух спектральных каналах, они значительно упрощают конструкцию ОЭС, а также позволяют использовать известные алгоритмы пространственно-временной фильтрации, обеспечивающие эффективную работу в условиях зашумленных сцен. Важной задачей совершенствования таких систем можно считать увеличение числа спектральных диапазонов работы ФПУ до трех-четырех, т.е. повышение их спектрального разрешения при сохранении высокой частоты просмотра наблюдаемой сцены.

Применение двух- и многодиапазонных матричных ФПУ, в которых выделение рабочих участков спектра (спектральных диапазонов) осуществляется непосредственно в приемнике излучения, позволяет упростить оптико-механическую схему современных ОЭС, заметно уменьшить их габариты, массу и энергопотребление, увеличить быстродействие. Наряду с такими системами в настоящее время успешно функционируют двух- и многоканальные ОЭС, в которых разделение на отдельные спектральные каналы происходит в оптической системе. Иногда к ОЭС-3 относят системы, в которых один из спектральных каналов работает в видимой области спектра, а остальные – в инфракрасной.



Рис. 4. *Схема многодиапазонной оптико-электронной системы*

Подавляющее большинство двух- и многодиапазонных ОЭС со сканированием использует сложные и часто громоздкие оптические системы, основанные на использовании либо диспергирующих элементов типа призм или дифракционных решеток, либо сменных узкополосных оптических фильтров. В первом случае приходится применять несколько приемников, чувствительных в различных спектральных каналах системы, во втором – один приемник, но чувствительный во всем широком рабочем диапазоне ОЭС.

Хорошо известными многоспектральными системами являются видеоспектрометры со сканированием просматриваемой сцены, широко применяемые для дистанционного зондирования с 1980-90-х годов. Видеоспектрометры со сканированием обеспечивают достаточно высокое спектральное разрешение, однако они не позволяют одновременно и в реальном масштабе времени, т.е. с высокой частотой, получать информацию о пространственных характеристиках наблюдаемой сцены в различных спектральных диапазонах (на различных

длинах волн), что очень важно для ряда применений, особенно военных. Поскольку в таких ОЭС по мере увеличения числа спектральных каналов уменьшается величина сигнала, приходящегося на отдельный канал, и, следовательно, уменьшается отношение сигнал-шум, в них часто для компенсации этого уменьшения используется временная задержка и интегрирование сигналов. Однако этот способ также не позволяет реализовать режим реального времени.

3.3. Совершенствование оптических систем

Совершенствование ОЭС идет, во многом, за счет новой элементной базы – новых оптических систем, ФПУ, систем охлаждения, схем обработки сигналов, систем отображения и др. При разработке двухдиапазонных систем все чаще применяются оптические системы с переменным диафрагменным числом объектива, в состав которого входит охлаждаемая диафрагма. При меньшем диафрагменном числе K лучше решается задача обнаружения излучающих целей в длинноволновом ИК-диапазоне, а при большем K – задача идентификации целей в средневолновом диапазоне.

Совершенствуются оптические системы ОЭС-3, работающие активно-пассивным методом. В первых образцах таких систем передающие и приемные оптические системы были разнесены. Затем появились совмещенные приемо-передающие оптические системы, что устранило возникновение параллакса при работе на различных расстояниях. В приемной системе для разделения рабочих спектральных диапазонов использовалось цветоделение и два или более приемника излучения. В последнее время появились опытные образцы систем с единой для всех диапазонов приемной оптической системой и интегрированным ФПУ.

Агентство DARPA (США) спонсирует программу MONTAGE по разработке компактной ОЭС, работающей одновременно в видимом и ИК диапазонах спектра. Сокращение продольного габарита оптической системы достигается за счет использования сложного двухстороннего зеркала с несколькими отражательными концентрическими кольцевыми зонами различной кривизны на каждой стороне зеркала и деления входного зрачка объектива на три концентрические зоны. Центральная зона I (в виде круга), заменяющая обычную для зеркальных и зеркально-линзовых систем зону затенения, используется для размещения широкопольного линзового объектива, работающего в видимом диапазоне. Следующая за ней кольцевая зона II используется для работы в видимом диапазоне зеркального объектива с трехкратным отражением лучей. Третья, периферийная кольцевая зона III работает в длинноволновом ИК-диапазоне как зеркальный объектив с четырехкратным отражением лучей, собирающихся на чувствительном слое приемника – микроболометра (640×480 пикселей). Концентрические кольцевые асферические поверхности на обеих сторонах зеркала выполнены с помощью алмазного точения. Так как все три объектива (зоны) имеют общую оптическую ось, в системе отсутствует параллакс

создаваемых ими изображений, что особенно важно для просмотра сцен с большой глубиной поля.

Для ослабления или исключения вредного влияния собственного излучения оптических деталей на работу высокочувствительных ФПУ, охлаждаемых до криогенных температур, продолжаются попытки разработать такие ОЭС, в которых оптическая система помещается вместе с ФПУ в единый охлаждаемый объем – DDCA (Detector-Dewar-Cooler Assembly). Достоинствами таких систем являются: отсутствие механической или электронной системы коррекции расфокусировки, возникающей при изменении температуры окружающей оптических среды; снижение требований к системе коррекции неоднородности чувствительности пикселей ФПУ, также возникающей при изменении температуры окружающей среды; кроме того, за счет уменьшения количества и длительности этапов калибровки ФПУ при такой коррекции уменьшается «нерабочее» время функционирования системы; снижение уровня фона от внутриприборного излучения, т.е. собственного излучения оптических деталей и их оправ, имеющих стабилизированную криогенную температуру охлаждения.

Интересной представляется конструкция ИКС со встроенной в сосуд Дьюара оптической системой, состоящей из трех линз и спектрального фильтра. Перед дьюаром расположен неохлаждаемый защитный оптический компонент – обтекатель, представляющий собой тонкий выпуклый мениск с одинаковыми внешним и внутренним радиусами, т.е. имеющий нулевую оптическую силу. Охлаждаемая до 80 К система с диафрагменным числом $K=2$ и угловым полем $105 \times 135,5^\circ$ предназначена для получения изображения дальнего поля при фокусировке на бесконечность или на другое фиксированное большое расстояние. В связи с разными углами падения лучей на поверхности компонентов использованы просветляющие покрытия двух типов (для малых и больших углов падения). Масса системы не превышает 5 г, а габариты невелики, что делает незначительной тепловую нагрузку (охлаждаемую массу) системы охлаждения. Исследования этой системы показали, что качество изображения точечного объекта, полученного с ее помощью, близко к дифракционному пределу – значение функции передачи модуляции не снижалось менее $0,66 \dots 0,7$ от максимума для угла визирования 72° и пространственной частоты 24 ед./мм. В кружке рассеяния радиусом 7 мкм содержалось 70...75 % от всего потока, собираемого системой. Изменение облученности чувствительного слоя ФПУ не превышало 10 % на краю поля размером 65° .

Усиливается внимание к сверхширокоугольным (панорамным) оптическим системам, первые сведения о схемах которых появились у нас в стране еще в конце 1980-х годов. Если раньше в зарубежной научно-технической литературе сведения о панорамных оптических системах приводились в виде общих схем и патентных описаний, то в 2010 г. появились

публикации о разработках промышленных образцов ОЭС с панорамными объективами в виде моноблоков. Так, описывается панорамный ИК-датчик, работающий в спектральном диапазоне 3,4...4,9 мкм и имеющий угловое поле 360° (по азимуту) и 60° (по углу возвышения). В датчике используется ФПУ (640×512 пикселей размером 20 мкм) на базе InSb. Угловое разрешение датчика близко к 6 мрад, но изменяется по углу возвышения. Частота кадров достигает 120 Гц. Датчик имеет цифровой 14-битовый выход. Габариты датчика – 228 мм (длина) и 218 мм (диаметр); масса – менее 9 кг, потребляемая мощность – от 30 до 50 Вт в зависимости от режима эксплуатации.

Для перископов подводных лодок была разработана панорамная ИКС с угловым полем 360×40° (–10×+30°), работающая в среднем ИК-диапазоне. В ней использовано охлаждаемое до 80 К ФПУ (2048×2048 пикселей размером 15 мкм) на базе InSb. Система охлаждения обеспечивает холодопроизводительность порядка 750 мВт при комнатной температуре и потребляемой мощности 50 Вт. Испытания системы показали, что она обеспечивает величину NETD = 30 мК по всей площади ФПУ при остаточной неоднородности по всему изображению не более 0,01 %. Наряду с созданием панорамных систем с объективом в виде единого моноблока продолжается разработка ИКС с комбинированием отдельных широкопольных объективов в единую систему с азимутальным угловым полем 360°. Примером может служить противовоздушная корабельная инфракрасная следящая система ARTEMIS, предназначенная для автоматического обнаружения низколетящих воздушных и надводных целей по их собственному излучению и для слежения за ними. Система состоит из трех сопряженных по азимуту (расположенных вокруг одной вертикальной оси) датчиков, объективы которых имеют угловые поля 120×26°. Система работает в спектральном диапазоне 3...5 мкм с частотой кадров 10 Гц.

3.4. Новые фотоприемные устройства

Ведущие компании США и других стран активно разрабатывают новые ФПУ на базе как традиционных материалов (тройные соединения «кадмий-ртуть-теллур» – КРТ, структуры с квантовыми ямами – СКЯ, структуры на базе InGaAs), так и структур с квантовыми точками или структур на суперрешетках типа II, которые еще совсем недавно находились на стадии лабораторных исследований [19].

Как известно, уменьшение размеров пикселей ФПУ до пределов, близких к дифракционному разрешению, позволяет увеличить их количество, т.е. повысить геометрооптическое разрешение ФПУ. Исследования, проведенные Директоратом ночного видения и электронных датчиков Армии США (NVESD), как и рядом ведущих фирм, показывают, что с точки зрения современных требований к оптическому (геометрооптическому) и энергетическому разрешению, а также к оптимизации конструкций оптических систем и ФПУ,

снижению их стоимости и энергопотребления и уменьшению габаритов целесообразно создавать ФПУ, размер пикселей которых составляет 12...15 мкм. При этом возможное уменьшение площади подложки ФПУ позволяет снизить его стоимость и уменьшить объем дьюара системы охлаждения, а следовательно, и энергопотребление этой системы. Однако следует учитывать возможное возрастание шума, эквивалентного разности температур (NETD) за счет насыщения ячеек схемы накопления и считывания зарядов.

Примером разработок, направленных на уменьшение размеров пикселей ФПУ на базе КРТ, являются созданные компанией AIM Infrarot-Module GmbH КРТ-ФПУ (640×512 пикселей размером 24 и 15 мкм), работающие в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах. В типовой конструкции ИКС на их основе применяется охлаждаемая диафрагма (диафрагменное число объектива $K=4,6$). При времени накопления 5 мс в среднем ИК-диапазоне значение NETD не превышает 25 мК, а в длинноволновом ИК-диапазоне с граничными длинами волн спектральной характеристики $\lambda_{гр} = 9,2$ мкм (при температуре охлаждения $T_{охл}=67$ К) или $\lambda_{гр}=10$ мкм при $K = 2,05$ и времени накопления 180 мкс величина NETD не превышает 38 мК. Для охлаждения этих ФПУ используются либо традиционные портативные системы с вращающимся компрессором, обладающие сравнительно небольшим энергопотреблением (Ricor R508), либо новые бесшумные линейные системы с увеличенным сроком безотказной работы – более 20 тыс. часов (5X095). Компания ставит своей задачей создание двухдиапазонных ФПУ (0,9...2,5 и 12...15 мкм) для дистанционного зондирования из космоса. Кроме того, для работы в среднем ИК-диапазоне предполагается создать охлаждаемые до 120 К ФПУ (640×512 пикселей размером 12 мкм), что позволит уменьшить габариты, массу, энергопотребление и стоимость систем, в которых они будут использоваться.

Для создания двухдиапазонных КРТ-ФПУ (640×512 пикселей размером 24 и 20 мкм), работающих в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах, компания SELEX Galileo Infrared Ltd. использует эпитаксию паров металлоорганических соединений, что позволяет снизить стоимость, увеличить выход крупноформатных ФПУ с малым процентом дефектных пикселей и уменьшить неоднородность чувствительности отдельных пикселей. Использование подложки из GaAs позволяет объединить фоточувствительный слой и схему накопления и считывания, а также уменьшить, по сравнению с подложками из CdZnTe, остаточные напряжения и потери на отражение. Как сообщается в работе [20], за счет уменьшения размеров пикселей до 24 мкм в среднем ИК-диапазоне удалось достичь значения NETD порядка 10 мК, а при размерах пикселей 20 мкм – порядка 14 мК. В длинноволновом ИК-диапазоне NETD = 23 и 27 мК для пикселей размером 24 и 20 мкм соответственно. Следует отметить, что достижение значения NETD < 20 мК в среднем ИК-диапазоне для пикселей размером 16 мкм стало возможным при $T_{охл} \approx 150$ К.

Переход к использованию кремниевых подложек при изготовлении крупноформатных КРТ-ФПУ (1536×1024 пикселей размером 15 мкм), работающих в ближнем и среднем ИК-диапазонах при $T_{охл} = 140 \dots 160$ К, позволил при диафрагменном числе $K = 3,4$ увеличить $\lambda_{гр}$ в ближнем ИК-поддиапазоне до 3,7 мкм и в среднем ИК-поддиапазоне до 4,8 мкм при $T_{охл} = 115$ К [21]. Сочетание фоточувствительного слоя из КРТ и кремниевой схемы накопления и считывания позволило компании QinetiQ Ltd. разработать ФПУ с $NETD \approx 10$ мК при частоте кадров 2 кГц для широкого спектрального диапазона – 2,5...10,5 мкм [22].

Известные достоинства ФПУ на базе структур с квантовыми ямами (ФПУ-СКЯ) послужили основанием для выбора таких устройств при обеспечении работы ряда ИКС в длинноволновом ИК-диапазоне. В работе [23] сообщается о первых испытаниях крупноформатного ФПУ-СКЯ (1024×1024 пикселей размером 30 мкм), работающего одновременно в спектральных диапазонах 4,4...5,1 и 7,8...8,8 мкм при температуре 68 К. В этих диапазонах значение $NETD$ такого мегапиксельного ФПУ составляет порядка 27 и 40 мК соответственно.

Как альтернативу ФПУ на основе КРТ и СКЯ в последние годы все чаще рассматривают фотоприемники на основе суперрешеток с деформированным слоем типа II (Type II Superlattice – T2SL). Такие ФПУ позволяют сравнительно просто получать перестраиваемую длинноволновую границу спектральной характеристики, обладают высокой поглощательной способностью и, как следствие, высокой квантовой эффективностью, более однородны по фоточувствительному слою и имеют малые темновые токи. Сегодня создание крупноформатных ФПУ на базе T2SL затруднено вследствие ограниченных размеров подложек из GaSb, применяемых при их изготовлении. Лучшие T2SL-ФПУ имеют размер 320×256 пикселей. В работе [24] сообщается об изготовлении T2SL-ФПУ на базе гибридных гетероструктур InAs/GaInSb/AlGaInSb (256×256 пикселей размером 40 мкм), работающих при температурах 78...80 К и имеющих квантовую эффективность около 40 % на длине волны 8 мкм. Темновые токи этих ФПУ в 10...20 раз меньше, чем у близких по параметрам КРТ-ФПУ. Значение $\lambda_{гр}$ таких ФПУ может изменяться от 9 до 11,5 мкм.

В последнее время обсуждается возможность создания T2SL-ФПУ на подложках из GaAs, хорошо освоенного в электронной промышленности. В работе [25] указывается, что в таких ФПУ уже достигнута удельная обнаружительная способность $D^* = 1,1 \cdot 10^{11}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2} при $T_{охл} = 77$ К в диапазоне 8...12 мкм.

Для работы в коротковолновом ИК-диапазоне (1,0...2,5 мкм) часто предлагается использовать фотодиодные ФПУ на базе структур InGaAs/GaAsSb типа II, выращенных на подложке из InP. Системы с InGaAs-фотодиодами чувствительны к ИК-излучению с длиной

волны до 1,7 мкм (при рабочей длине волны $\lambda_0 = 0,53$ мкм) и до 2,5 мкм (при $\lambda_0 = 0,8$ мкм), где велико излучение вспышек выстрелов, детонаций, факелов ракет, а также наблюдается ночное свечение атмосферы, вызванное ионизацией в верхних ее слоях и обеспечивающее работу ИКС в безлунную ночь. Малая инерционность InGaAs-фотодиодов позволяет регистрировать быстропротекающие процессы (например, при быстром взаимном перемещении носителя ФПУ и просматриваемой сцены). Эти системы имеют малые темновые токи и поэтому не требуют криогенного охлаждения; они работают с термоэлектрическими охладителями, необходимыми для коррекции неоднородности чувствительности и темновых токов отдельных пикселей.

Спонсируемая Агентством по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам Армии США (DARPA) компания Goodrich ISR Systems создала на основе InGaAs-ФПУ (640×512 пикселей) систему SU640KTXS с массой менее 100 г, частотой кадров 60 Гц и разрядностью видеовыхода 12 или 14 бит [26]. В этой системе имеется блок двухточечной коррекции неоднородности, автоматическая регулировка усиления, блок улучшения изображения и форматирования видеовыхода. Термоэлектрический охладитель используется для стабилизации ФПУ при одном значении температуры – 18 или 23 °С. Аналого-цифровые преобразователи интегрированы в схему накопления и считывания, что обеспечивает небольшие размеры, массу и энергопотребление ФПУ. Так, общая потребляемая мощность устройства составляет менее 1 Вт.

В целях уменьшения потребляемой мощности и перехода к трехточечной системе коррекции неоднородности и компенсации любых температурных изменений авторы [26] предлагают применять так называемую параметризованную систему коррекции. Параметры алгоритма коррекции, включающие степень полинома, знак, величину и число битов, предназначены для кодировки каждого полиномиального коэффициента, характерного для конкретного ФПУ. В результате заводской калибровки ФПУ создается загружаемая в память таблица. При этом появляется возможность отказаться от термоэлектрической системы стабилизации температуры, что уменьшает не только потребляемую мощность, но и массу, и габариты системы, прежде всего, за счет отказа от сравнительно большого и тяжелого герметичного вакуумированного корпуса ФПУ. Это особенно важно для разрабатываемых ФПУ, количество пикселей которых составляет 1280×1024.

Компания RTI International сообщила о новых образцах фотоприемников на базе квантовых точек (ФКТ-ФПУ) с увеличенным по сравнению с ФПУ на базе InGaAs спектральным диапазоном [27]. Квантовая эффективность таких фотодиодов превышает 50 %, а постоянная времени составляет менее 10 мкс, что делает их пригодными для использования в быстродействующих ИКС. Линейность входного сигнала наблюдалась в динамическом диапазоне 40 дБ. Такие устройства работают при комнатной температуре и хорошо сочетаются с

монолитными интегральными схемами считывания на гибких подложках, что снимает любые ограничения по размеру ФПУ. Технология их изготовления достаточно проста, что позволяет значительно снизить стоимость ФПУ и создавать крупногабаритные многодиапазонные МФПУ с расширенной спектральной характеристикой в диапазоне 0,25...1,8 мкм.

3.5. Системы охлаждения для ИК-ФПУ

Один из недостатков высокочувствительных ФПУ – необходимость снабжения их криогенными охлаждающими устройствами, что увеличивает стоимость, массу, габариты и энергопотребление ИКС в целом, ограничивает срок службы системы, увеличивает шумы и вибрации. В этой связи все большее распространение в ИКС нового поколения находят импульсно-трубочные криогенные устройства с линейным перемещением регенератора. Такие устройства хотя и уступают устройствам с вращающимся компрессором по габаритам, массе и потребляемой мощности, однако более удобны в размещении, создают меньший акустический шум и вибрации, а главное, обладают значительно большим временем безотказной работы. Уменьшение объема и гидравлического диаметра регенератора, а также увеличение среднего давления позволяет обеспечить высокую эффективность работы криогенных устройств. В экспериментах, описанных в работе [28], хорошая эффективность достигалась при частоте импульсов 100...140 Гц. Увеличение рабочего давления и рабочих частот привело к заметному сокращению времени выхода на требуемый температурный режим и уменьшению габаритов системы охлаждения. Миниатюрное импульсно-трубочное криогенное устройство обеспечивает температуру 80 К и частоту 150 Гц при среднем давлении 5 МПа. Диаметр и длина регенератора составляют 4,4 и 27 мм соответственно. Наименьшая достигнутая температура равнялась 97 К. Время установления температуры 80 К составило 5,5 мин.

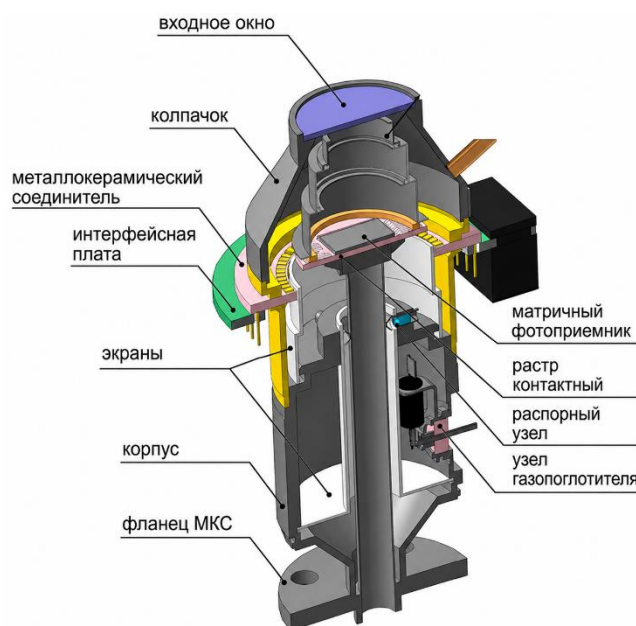


Рис. 5. МФПУ на микрокриогенной системе

Компанией Ricor создано криогенное устройство, работающее на частотах до 200 Гц и обеспечивающее температуру 95 К при холодопроизводительности 1 Вт. В этом устройстве используется поршневой компрессор с подшипниками на подвижных магнитах и пневматически управляемый расширитель, соединенные между собой обратной связью [29].

В связи с постоянным стремлением снизить стоимость и массу системы охлаждения ФПУ, увеличить срок ее службы и избежать применения движущихся деталей не пропадает интерес к термоэлектрическим охладителям. Сегодня лучшие из них, имеющие четыре ступени охлаждения, обеспечивают перепад температур порядка 110 К. Как указывается в работе [30], с их помощью для ФПУ на базе КРТ удастся обеспечить рабочую температуру 210 К и значение NETD порядка 30 мК при $K=2$.

Компаниями BAE Systems, Vectronix, DRS, Raytheon Vision Systems, Ulis, L-3 Infrared Products, FLIR Systems ведутся перспективные разработки тепловизионных систем с неохлаждаемыми приемниками на базе микроболометров, размер пикселей которых составляет 15...17 мкм. Количество пикселей разработанных ФПУ составляет 640×480 и 1024×768, а NETD ≤ 45 мК. В настоящее время Директорат ночного видения и электронных датчиков Армии США (NVESD) финансирует исследования и разработки, имеющие целью довести размеры пикселей микроболометров до 12 мкм.

3.6. Микросканирование как способ повышения разрешения

Одним из способов повысить геометрическое разрешение ОЭС без увеличения габаритов ФПУ и количества пикселей является микросканирование. Наиболее часто амплитуда принудительного перемещения изображения по поверхности фоточувствительного слоя ФПУ равна размеру двух пикселей по каждой из декартовых координат. Это позволяет удвоить эффективное количество пикселей ФПУ, т.е. повысить в два раза разрешение, не увеличивая размеры устройства, а также удвоить частоту Найквиста, определяющую предельную пространственную частоту в спектре изображения, передаваемую без искажений.

В работе [31] описывается телевизионная ИКС с зеркально-линзовым объективом, построенным по схеме Кассегрена с коэффициентом затенения 0,5, на базе микроболометра (640×480 пикселей размером 25 мкм). Микросканирование в этой системе обеспечивается путем колебания второго зеркального компонента объектива (контррефлектора) с амплитудой 50" по двум осям, совпадающим с осями матрицы ФПУ. Наклоны контррефлектора приводят к перемещениям изображения на два пикселя по каждой оси, т.е. эффективный размер ФПУ становится равным 1280×960. Это позволило отказаться от увеличения вдвое фокусного расстояния объектива в целях повышения разрешения и, собственно, от увеличения его массы и габаритов.

Система работает в спектральном диапазоне 7...14 мкм, фокусное расстояние объектива равно 50 мм, а угловое поле 22,6°. Эффективное диафрагменное число – не менее 1,5. Поверхности первичного и вторичного зеркал, а также полевой линзы, помещаемой перед микроболометром, выполнены асферическими. Падение освещенности для углов в 6° не превышает 15 %. Объектив снабжен блендами, снижающими засветку. Диаметр объектива 75 мм, а длина 100 мм; его масса не превышает 250 г. Подбор материалов зеркал и их оправ позволяет осуществить атермализацию для диапазона окружающих температур от –30 до +60 °С. Глубина изображаемого пространства – от 25 м до бесконечности. Размер чувствительного слоя микроболометра 16×12 мм². Значение NETD при эффективном относительном отверстии объектива 1:1 и частоте кадров 60 Гц составляет около 60 мК. Переход от одного пиксела к другому при микросканировании не превышает 1,5 мс, что гораздо меньше постоянной времени микроболометра (7,5 мс). В системе имеется ручная механическая система фокусировки с разрешением 5 мкм в диапазоне 2,5 мм. Общая длина оптического блока, включая бленду, составляет 114 мм. Микросканирование повышает разрешение системы до 40 лин/мм. Наибольшее разрешение достигается в центре углового поля. Виньетирование из-за затенения части пучка лучей контррефлектором на краю поля составляет около 69 %. Этот эффект устраняется путем калибровки системы, при которой между полевой линзой и микроболометром периодически вводится затвор-шторка. Дисторсия на краю поля не превышает 2 %. Механизм микросканирования, потребляющий мощность порядка 1 Вт, может быть отключен, если не требуется высокое пространственное разрешение.

3.7. Оптические системы с переменным диафрагменным числом и охлаждаемой диафрагмой

При разработке двухдиапазонных систем все чаще применяются оптические системы с переменным диафрагменным числом объектива, в состав которого входит охлаждаемая диафрагма. При меньшем диафрагменном числе K лучше решается задача обнаружения излучающих целей в длинноволновом ИК-диапазоне, а при большем K – задача идентификации целей в среднем ИК-диапазоне. Так, разрабатываемые компанией AIM Infrarot-Module GmbH системы имеют охлаждаемые диафрагмы, что позволяет изменять диафрагменные числа: от $K=3$ и менее в длинноволновом ИК-диапазоне до $K=6$ и более в среднем ИК-диапазоне [19].

3.8. Динамический солнечный фильтр

Одним из направлений развития современных ОЭС является создание адаптивных систем, способных изменять свои параметры и характеристики при изменении внешних условий. Простейшими являются системы, в которых автоматически изменяется величина потока при облученности на фоточувствительном слое ФПУ, что предотвращает насыщение ячеек схемы

считывания зарядов с пикселей ФПУ или растекание зарядов по соседним пикселям, т.е. снижение разрешающей способности всей системы. Примером таких систем является устройство, работающее в видимом и ближнем ИК-диапазонах и названное динамическим солнечным фильтром (DSF – Dynamic Sunlight Filter) [32]. В исходном (нормальном) состоянии, когда облученность не превышает некоторого заданного уровня, фильтр прозрачен. При превышении заданного уровня облученности в течение короткого времени (менее 1 мс) фильтр становится малопрозрачным, обеспечивая уменьшение облученности фоточувствительного слоя. Восстановление исходного состояния также занимает не более 1 мс.

4. Проблемы промышленного внедрения широкоспектральных ОЭПК

Как отмечают Сеник Б.Н., Калюгин В.С. и Митрофанова Ю.С. [8], создание инновационных оптико-электронных приборов, функционирующих в видимом и различных ИК-диапазонах, сопряжено с комплексом технологических проблем, которые можно систематизировать по следующим направлениям:

4.1. Организация производства оптических материалов

В Российской Федерации производство таких материалов, как монокристаллические германий и кремний, сапфир ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), поликристаллические ZnS, ZnSe, MgF_2 , LiF_2 , в основном налажено. Однако требуется корректировка технических условий в части введения дополнительных нормируемых параметров и ужесточения точности измерений оптических характеристик. Особую сложность представляет прецизионное формообразование крупногабаритных оптических элементов из этих материалов.

4.2. Создание метрологической базы

Необходима разработка средств аттестационных измерений параметров оптических сред, а также геометрических и светотехнических характеристик готовых изделий. В последнее десятилетие особенно заметно стало сказываться отсутствие унифицированной контрольно-испытательной и калибровочной аппаратуры, что во многом связано с заметным увеличением чувствительности и разрешения ОЭС (пространственного, температурного, энергетического, динамического), а также с расширившимся кругом их применения. Например, появилась необходимость создания эталонных излучателей – черных тел с большой равномерно (однородно) излучающей площадью и большим диапазоном температур – от криогенных до солнечных, а также аппаратуры, позволяющей имитировать работу ОЭС в вакууме. Оборудование для исследований и испытаний как в лабораторных, так и в полевых условиях должно хорошо сочетаться с интерфейсом разнообразных ОЭС, а также с их компьютерными моделями.

4.3. Внедрение асферических и киноформных элементов

Требование минимизации массогабаритных параметров приводит к сокращению числа традиционных сферических линз и внедрению асферических и киноформных элементов. Это, в свою очередь, требует разработки инновационных технологических процессов их изготовления, методов контроля качества и соответствующих отраслевых нормативных документов.

4.4. Технологии нанесения покрытий для ИК-диапазонов

Освоение комплексных технологий нанесения светоделительных, просветляющих и других типов покрытий для различных ИК-диапазонов требует специализированного вакуумного оборудования, спектрофотометров, а также отработки методов нанесения равнотолщинных покрытий на крутые поверхности без искривления геометрии.

4.5. Сборка и юстировка

Наличие киноформных и асферических элементов, ломаных оптических осей предъявляет высокие требования к технологиям сборки и юстировки. Необходима отработка методов прецизионной автоколлимационной вточки элементов в оправы с точностью позиционирования 0,005 мм, а также создание ИК-контрольно-юстировочных стендов и имитаторов.

5. Методы математического моделирования

Разработка современных ОЭПК немыслима без математического моделирования. Как отмечено в материалах конференции, при проектировании аппаратуры целесообразно различать три типа математических моделей: экспресс-оценки, имитационные модели и цифровой образец изделия.

Экспресс-оценка представляет собой упрощенную аналитическую зависимость, полученную путем аналитического решения конкретной задачи либо путем аппроксимации численных решений, отражающую частные существенные связи между параметрами конструкции, характеристиками ее состояния и условиями эксплуатации. Применение экспресс-оценок позволяет сократить время на проектирование аппаратуры, проведение испытаний, дает возможность оперативно оценивать влияние отклонений параметров деталей на аппаратуру в целом при изготовлении, сборке и в процессе эксплуатации.

Имитационная модель – это численный расчет, позволяющий определять выходные оптотехнические характеристики ОЭПК для заданных параметров конструкции, характеристик ее состояния и их изменений в условиях эксплуатации. Компьютерное моделирование обеспечивает общий подход к описанию условий работы и особенностей ОЭС, а также позволяет вносить различные коррективы практически на любых этапах проектирования.

Цифровой образец – технология математического моделирования ОЭПК, построенная на основе электронной модели изделия в некоторой CAD-системе и всей совокупности

примененных экспресс-оценок и имитационных моделей, которая обеспечивает адекватное «поведение» цифрового образца в условиях эксплуатации.

Обобщенная компьютерная модель ОЭС должна отражать самые важные особенности функционирования и описывать наиболее общие конструктивные признаки. Методика ее составления базируется на блочно-иерархическом подходе, который заключается в разделении представлений об объекте моделирования на несколько иерархических уровней, различающихся степенью детализации. Структура обобщенной компьютерной модели ОЭС обычно представляется в виде отдельных функциональных модулей, включая модуль «Фоно-целевая обстановка», описывающий излучатели, участвующие в формировании сигнала, и условия работы системы, а также модуль «Структура ОЭС», представляющий процесс преобразования сигнала от входного зрачка до выходного блока [6].

6. Вычислительная оптика: от искусства к инженерной дисциплине

Как подчеркивает Бездидько С. Н. [9], проектирование оптических систем до сих пор во многом остается «искусством», зависящим от опыта и интуиции разработчика, а не точной инженерной дисциплиной. Анализ существующих программных комплексов (включая ZEMAX) показывает отсутствие этапа синтеза, когда на основе технического задания автоматически вычисляются конструктивные параметры системы, обладающей необходимыми коррекционными возможностями. Предполагается, что исходная система уже существует или создается разработчиком самостоятельно.

Кроме того, существующие программы оптимизации обладают значительной локальной ограниченностью из-за многоэкстремальности оценочной функции. Оптимизация часто приводит не к приемлемому решению, а к ближайшему локальному экстремуму. Отсутствуют методы анализа коррекционных возможностей систем и диагностики причин неудачной оптимизации.

В связи с этим особую актуальность приобретают работы по развитию новых направлений вычислительной оптики, обеспечивающих:

- формализацию процесса проектирования;
- создание методов, алгоритмов и программного обеспечения для синтеза оптических систем;
- разработку подходов к глобальной оптимизации, уменьшающих локальную ограниченность;
- создание рекомендаций по оценке коррекционных возможностей.

7. Методы обработки сигналов и изображений в ОЭПК

В большинстве современных и перспективных ИКС алгоритм обработки сигналов, снимаемых с ФПУ и используемых для визуализации изображения, должен включать в себя такие

операции как коррекция напряжения смещения и коэффициента усиления, коррекция неоднородности и замещение дефектных пикселей ФПУ, динамическое сжатие, сегментирование, гамма-коррекцию, управление контрастом в различных участках изображения просматриваемой сцены, т.е. адаптивное локальное динамическое сжатие сигналов в реальном масштабе времени или от кадра к кадру, и ряд других. В ОЭС-3 к ним добавляются алгоритмы управления масштабом изображений, получаемых в различных спектральных диапазонах, и их совмещение, т.е. управление форматом изображения и размерами пикселей. Учитывая непрерывное увеличение формата ФПУ и уменьшение его пикселей, эти задачи заметно усложняются.

7.1. Пространственно-временная фильтрация

Широко используются методы пространственно-временной фильтрации сигналов от объектов на фоне помех. Как показано в работе [12], вероятность ложных тревог при обнаружении одного или нескольких движущихся объектов с помощью многоэлементных ФПУ может быть снижена до $10^{-4} \dots 10^{-6}$ при числе кадров $n=10$ и до $10^{-12} \dots 10^{-15}$ при $n=20$. Дальнейшее развитие метода связано с применением адаптивных фильтров, минимизирующих погрешности определения скорости перемещения объекта.

7.2. Адаптивные системы

С учетом разнообразия условий эксплуатации актуально создание адаптивных ОЭС-3, сохраняющих высокое качество работы. Перспективными являются системы, в которых при случайных изменениях четкости и частоты кадров оптимальные параметры определяются выравниванием дисперсий межэлементных и межкадровых разностей [13].

7.3. Цифровая обработка и стабилизация

В современных ОЭС-3 применяются цифровые системы сложения изображений из разных спектральных каналов, что упрощает регулировку яркости, выделение целей и увеличивает угловое поле. Алгоритмическая (электронная) стабилизация изображения позволяет компенсировать межкадровые смещения без механических устройств, однако требует ФПУ повышенного разрешения и широкопольных объективов.

7.4. Нейросетевые методы

Нейронные сети используются для нахождения дискриминантной функции, разделяющей кластеры полезных сигналов и помех [8, 10, 11]. Для распознавания сложных образов в реальном масштабе времени эффективен метод нормированных канонических моментов. При сопоставлении текущего изображения с эталонным используются априорная информация об объекте и фоне. Основными трудностями являются недостаток априорной информации для построения адекватных имитационных моделей [14, 15], а также искажения и помехи.

7.5. Новые методы анализа

Перспективным является применение фрактального анализа текстуры [17], поскольку фрактальная размерность обладает масштабной инвариантностью. Также появляются сведения об обработке зашумленных изображений с помощью вейвлет-преобразований [16]. Тем не менее, универсальных методов анализа динамически изменяющихся сцен в настоящее время не существует.

7.6. Интеллектуальные методы обработки изображений

В современных ОЭС-З используются последние достижения цифровых методов обработки изображений. Нашли практическое применение цифровые системы сложения изображений, образующихся в отдельных рабочих спектральных каналах. При этом проще осуществляются регулировка яркости и выделение отдельных целей, устраняются различия во времени формирования изображений в отдельных каналах, обеспечивается большее угловое поле при независимой работе спектральных каналов. Кроме того, цифровое изображение легче встраивается в общий комплекс наблюдения и управления операциями.

Алгоритмическая (электронная) стабилизация изображения позволяет улучшить масс-энергетические и стоимостные характеристики комплексов, в составе которых работают многие ОЭПК. Она позволяет преобразовать нестабилизированную последовательность кадров, подверженных межкадровым пространственным смещениям, к выходной последовательности кадров, в которой нежелательные смещения изображения скомпенсированы в инерциальном пространстве в «подвижном» окне. В ОЭПК с электронной стабилизацией приходится применять ФПУ повышенного разрешения и широкопольные объективы с хорошим разрешением.

Широко обсуждаются возможные применения нейронных сетей в ОЭПК. С их помощью может находиться дискриминантная (решающая, разделяющая) функция, необходимая для разделения кластера полезных сигналов (признаков объекта) от кластера шумов и помех [8, 9]. Целью разработки нейросетевых алгоритмов является повышение эффективности систем автоматического сопровождения и распознавания локальных детерминированных объектов в сложных условиях наблюдения [10]. В задачах автоматического распознавания объектов наилучшим образом показали себя алгоритмы обработки изображений, основанные на применении глубоких искусственных нейронных сетей сверточного типа. Особенностью таких алгоритмов является их хорошая масштабируемость на другие образцы изображений объекта распознавания, отсутствовавшие в обучающей выборке.

Типовой процесс разработки нейронной сети можно разделить на три основных этапа: исследование задачи и выбор архитектуры, обучение и применение. Ключевым отличием разрабатываемых нейронных сетей для ОЭПК является их изначальная ориентированность на

применение в составе встраиваемых вычислительных комплексов, имеющих серьезные ограничения на массу, габариты, энергопотребление [10]. Это достигается путем применения целочисленной бинарной арифметики, что позволяет осуществить эффективную реализацию при ограниченных вычислительных ресурсах.

Для решения одной из важнейших задач – распознавания сложных образов и целей в реальном масштабе времени – эффективным оказывается использование метода нормированных канонических моментов различных порядков. Обнаружение и идентификация объектов часто происходят путем сопоставления образуемого системой текущего изображения с некоторым эталонным, при этом используется априорная информация об объекте и фоне (о сцене), а апостериорная информация представляет собой текущее изображение в том или ином рабочем спектральном диапазоне на выходе системы первичной обработки информации.

8. Многоканальные и мультиспектральные системы технического зрения

Системы технического зрения (СТЗ) уже в течение длительного времени остаются незаменимыми в различных областях деятельности человека: в обеспечении противопожарной безопасности, ликвидации последствий аварийных ситуаций техногенных катастроф и стихийных бедствий, контроле состояния продуктопроводов и различных строений, дефектологии и диагностическом обслуживании оборудования, в военном деле, охране объектов и общественного порядка и т.п. Для этого, в зависимости от специфики применения, используется аппаратура, работающая в определенном диапазоне длин волн (рентгеновский, оптический, СВЧ и др.), которая при необходимости объединяется в единые системные многофункциональные комплексы.

Важнейшим направлением развития СТЗ является расширение номенклатуры и области применения приборов оптического диапазона длин волн. Использование информации в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра позволяет исследовать окружающее пространство в целом и отдельные его объекты как по отраженному, так и по собственному их излучению. Это обеспечивает достижение высокой информативности СТЗ, позволяет исключить или, по крайней мере, уменьшить негативное влияние внешних воздействующих факторов на результаты исследований, создает условия для более детального изучения свойств наблюдаемых и изучаемых объектов.

Актуальность дальнейшего развития и создания многоканальных и мультиспектральных СТЗ с высоким пространственным и спектральным разрешением обусловлена необходимостью повышения эффективности технических средств и методов высокодетального дистанционного зондирования в оптическом диапазоне спектра, когда требуются высококачественные монохроматические изображения объектов естественного и/или искусственного происхождения

с одновременной интегральной визуализацией кадра. Это позволяет измерять пространственные и спектральные характеристики собственных или отраженных излучений у широкой номенклатуры объектов, интересующих многих пользователей. При комплексном дешифрировании массива разноспектральных изображений плохоразличимых объектов вероятность их обнаружения и распознавания становится существенно выше, чем при использовании обычных фотографических или телевизионных снимков.

Как известно, объекты окружающего пространства обладают рядом оптических характеристик (энергетических, пространственных, спектральных, поляризационных), численные значения которых присущи только данным объектам. Поэтому для их обнаружения, отождествления и исследования используются приборы различных классов, основанные на различных принципах действия (визуальные, телевизионные, тепловизионные, радиометрические, спектральные, поляризационные и пр.) и оптимальном сочетании этих принципов. Вследствие различия спектров отражения естественных и нарушенных антропогенным воздействием растительного, почвенного и снежного покровов, мультиспектральная съемка является одним из наиболее эффективных методов мониторинга заглубленных и обвалованных объектов, подземных коммуникаций транспорта и связи. Высокоразрешающие мультиспектральные информационно-измерительные комплексы необходимы и при выполнении различных геологических и инженерно-геологических изысканий, в частности, проводимых в интересах проектирования и строительства нефте- и газопроводов.

Чрезвычайно перспективным является применение мультиспектральных СТЗ в интересах экологии, особенно в задаче мониторинга объектов, вредное воздействие которых на окружающую среду проявляется в визуально не обнаруживаемых изменениях химического состава растительности, почв и воды (обнаружение стресса растительности при неблагоприятном воздействии нитратов и осадков тяжелых металлов из атмосферы), а также утечек углеводородов из магистральных продуктопроводов и «залповых» выбросов загрязнений, что особенно важно при оперативной оценке последствий стихийных бедствий, техногенных аварий, лесных пожаров и иных форс-мажорных обстоятельств. При необходимости контроля экологической обстановки на больших по площади территориях эффективность аэрокосмической мультиспектральной съемки оценивается в десятки раз выше по сравнению с традиционными химико-аналитическими методами по показателям оперативности и стоимости работ. Особую актуальность данное направление применения мультиспектральных средств наблюдения приобрело в настоящее время в связи с необходимостью определения состояния природной среды в районах чрезвычайных

ситуаций и оценки ущерба, нанесенного в результате стихийных бедствий и техногенных катастроф.

Актуальность и практическая значимость многоканальных и мультиспектральных СТЗ с высоким пространственным и спектральным разрешением подтверждаются их интенсивным развитием за рубежом при активном финансировании многих научно-технических программ такими организациями, как NASA, ESA, NASDA и др. При этом современная зарубежная аппаратура (AIS, AVIRIS, ROSIS, CASI, AISA, MODIS, MERIS, WIS и др.) авиационного и космического базирования может регистрировать до 200 и более мультиспектральных изображений. Очевидно, что при обработке таких больших массивов мультиспектральных изображений исследуемых сцен еще более важным становится вопрос уменьшения числа «базовых» (определяющих) точек каждой исследуемой сцены для максимального ускорения процесса обработки и распознавания различных природных и антропогенных объектов.

Интенсивное расширение и углубление областей применения на современном этапе развития СТЗ выдвигают противоречивые, близкие к теоретически предельным требования к аппаратуре по пространственным, спектральным, энергетическим и временным параметрам при жестких массогабаритных характеристиках и приемлемых стоимостных показателях.

Для их реализации актуальными становятся задачи выработки общих подходов к созданию высокоэффективных специализированных СТЗ как автономного функционирования, так и допускающих быструю, с минимальными затратами, адаптацию для работы в составе многофункциональных комплексов, дальнейшего совершенствования элементной базы, разработки новых методик и устройств получения, обработки и совместного использования многоканальной и мультиспектральной информации для конкретных областей применения.

В соответствии с изложенным в Новосибирском филиале Института физики полупроводников СО РАН «КТИПМ» поставлен цикл исследований, направленных на разработку основ оптико-информационных технологий создания многоканальных и мультиспектральных систем технического зрения с высоким пространственным и спектральным разрешением. В рамках проекта предполагается выполнение работ в следующих направлениях:

- исследование физико-технологических основ создания широкополосных неохлаждаемых матричных приемников нового типа для регистрации излучения средне- и длинноволнового инфракрасного диапазонов длин волн;
- разработка технологических основ изготовления многослойных, объемных композиций на основе органических, металлических и диэлектрических слоев с заданными оптическими, термодинамическими и механическими свойствами, исследование их оптических характеристик;

Системный подход к проектированию оптико-электронных приборов...

- разработка и предварительные исследования макета лабораторного измерительного модуля на основе микромеханического преобразователя и оптической системы считывания – прототипа серийного прибора;
- поиск новых и развитие существующих методов, программ и алгоритмов компенсации неоднородности и нестабильности элементов линейчатых и матричных фотоприемных устройств и обеспечения устойчивой работы оптико-электронных приборов на их основе в широком диапазоне климатических условий; разработка программно-аппаратных средств коррекции и формирования высокоинформативных изображений по результатам анализа реальных сцен и объектов наблюдения; разработка и исследование функциональных и технических характеристик модулей электронной обработки;
- обоснование и предварительный композиционный расчет оптимальных схем построения мультиспектральных СТЗ с высоким спектральным и пространственным разрешением;
- теоретический анализ и оценочные расчеты специфических искажений изображения в мультиспектральных СТЗ;
- обоснование и выбор оптимального состава каналов перспективных ручных и мобильных многоканальных оптико-электронных систем наблюдения и дистанционного зондирования, предварительная оптимизация основных параметров каналов;
- исследование и оптимизация необходимой степени интеграции каналов наблюдения; организация единого информационного поля и согласование масштабов изображения каналов;
- теоретические и экспериментальные исследования возможностей повышения дальности действия локационных каналов перспективных ручных и мобильных многоканальных оптико-электронных систем наблюдения и дистанционного зондирования.

Для успешного решения заявленных задач в КТИПМ имеется достаточный научный задел. В частности, системный анализ пространственно-временных, частотно-контрастных и спектральных характеристик типовых объектов и фонов позволил сформировать концептуальные требования к построению оптико-электронных модулей для СТЗ, в полной мере реализующих высокие метрологические и эксплуатационные характеристики современной элементной базы. На их основе создан унифицированный ряд приборов для наблюдения окружающего пространства и регистрации объектов и целей, часть из которых по функциональному назначению и техническим характеристикам не имеет зарубежных аналогов.

9. Космические системы ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

Анализ мировых тенденций, проведенный Баклановым А.И. [10], показывает, что с 1999 года (запуск Ikonos-2) началась эпоха коммерциализации космических систем ДЗЗ высокого разрешения. Основные тенденции включают:

9.1. Повышение разрешающей способности

Разрешение коммерческих спутников улучшилось с 0,81 м (Ikonos-2) до 0,31 м (WorldView-3/4). Это достигается увеличением фокусного расстояния, уменьшением размера пикселей (с 12 до 8 мкм) и снижением высоты орбит (до 617 км). При этом полоса захвата сохраняется за счет увеличения длины строки фотоприемников (до 43–54 тыс. пикселей).

9.2. Рост информационной производительности

Объем бортовой памяти вырос с 64–128 Гбит до 3200 Гбит (WorldView-4), скорость передачи данных – до 1200 Мбит/с. Суточная производительность съемки одного аппарата достигает 700 тыс. км².

9.3. Группировки спутников

Крупнейшая группировка DigitalGlobe включает 5 спутников, обеспечивающих повторную съемку до 4,5 раз в сутки. Развиваются группировки микроспутников (Planet: 144 наноспутника Flock с разрешением 3,7 м, а также SkySat с разрешением 0,7–0,9 м). Китай разворачивает группировки SuperView (0,5 м), Россия – три спутника «Ресурс-П».

9.4. Космическая видеосъемка

Спутники SkySat обеспечивают видеосъемку в формате HD 1920×1080 с частотой 30 кадров/с. Развиваются проекты BlackSky Global (60 спутников, разрешение 1 м), Satellogic (гиперспектральная съемка). Видеоданные используются для контроля транспорта, мониторинга промышленных объектов и чрезвычайных ситуаций.

10. Взаимодействие университетов и предприятий отрасли

Барышников Н.В. [11] отмечает, что развитие оптико-электронного направления в МГТУ им. Н.Э. Баумана (с 1938 г.) всегда проходило в тесном взаимодействии с промышленностью. В настоящее время университет ведет подготовку по бакалавриату (40 чел./год), специалитету (91 чел.) и магистратуре (24 чел.), причем целевой прием на специалитет достигает почти 100%. Преподаватели кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» являются действующими инженерами и научными сотрудниками, что обеспечивает связь теории с практикой.

Важным направлением является реализация программ повышения квалификации и переподготовки кадров (от 30 до 300 часов в год). Примером успешного сотрудничества служит создание учебной лаборатории «Оптические технологии» при поддержке ЛЗОС и КМЗ. В планах – модернизация лабораторий «Приемников оптического излучения» и «Лазерной техники».

Особое внимание уделяется инновационным проектам по увеличению выпуска гражданской продукции на предприятиях отрасли совместно с холдингом «Швабе».

11. Приоритетные задачи и основные тенденции развития ОЭС на ближайшие годы

К числу основных задач, стоящих перед разработчиками ОЭС на ближайшие 5...10 лет, относятся:

- разработка методики выбора оптимальных спектральных рабочих диапазонов для систем конкретного назначения;
- определение корреляционных связей между сигналами, получаемыми в различных спектральных диапазонах;
- классификация различных объектов (материалов, покрытий, образований), обнаруживаемых или наблюдаемых с помощью ОЭС;
- использование различий в поляризационных характеристиках отдельных объектов и фонов, на которых они наблюдаются.

Основные тенденции развития и совершенствования ОЭС неоднократно рассматривались в литературе [1–3] и др. Напомним некоторые из них:

- расширение круга задач, решаемых одной и той же ОЭС (обнаружение, слежение, классификация, измерение и т.п.);
- повышение геометро-оптического, спектрального, временного и энергетического (температурного) разрешения;
- расширение спектральной области работы как в сторону УФ, так и в сторону длинноволнового ИК-диапазона;
- совершенствование элементной базы, в частности, создание новых многодиапазонных (многоспектральных) ФПУ высокого пространственного разрешения; и оптических систем, работающих в широком спектральном диапазоне; снижение массогабаритных параметров и энергопотребления; уменьшение стоимости компонентов ОЭС и систем в целом;
- совершенствование методов обработки сигналов в ФПУ и электронном тракте системы;
- создание адаптивных ОЭС с перестраиваемыми параметрами и характеристиками всей системы и отдельных ее звеньев (оптической системы, ФПУ, электронного тракта, системы отображения);
- увеличение частоты кадров – частоты просмотра наблюдаемой сцены;
- увеличение динамического диапазона обрабатываемых сигналов, в частности, увеличение диапазона аналого-цифрового преобразования до 15 бит и более;
- уменьшение габаритов, массы и энергопотребления;

- совершенствование методов проектирования и испытаний ОЭС, в частности, дальнейшее развитие компьютерного моделирования самих систем и условий их эксплуатации;
- снижение стоимости ОЭС.

Заключение

Проведенный системный анализ позволяет сформулировать следующие основные выводы и направления совершенствования ОЭПК:

1. Проектирование современных ОЭПК должно базироваться на системном подходе, охватывающем все этапы жизненного цикла – от анализа требований до эксплуатации.
2. Приоритетными технологическими проблемами являются: развитие производства оптических материалов для широкого спектрального диапазона, создание метрологической базы (включая эталонные излучатели и калибровочное оборудование), внедрение асферических и киноформных элементов, совершенствование технологий нанесения покрытий и прецизионной юстировки.
3. Необходимо развитие вычислительной оптики в направлении формализации этапа синтеза и создания методов глобальной оптимизации, преодолевающих локальную ограниченность существующих программ.
4. Эффективность ОЭПК повышается за счет применения адаптивной пространственно-временной фильтрации, цифровой обработки, нейросетевых алгоритмов и фрактального анализа.
5. Мировые тенденции развития космических систем ДЗЗ демонстрируют непрерывный рост разрешения, информационной производительности и переход к большим группировкам малых спутников, включая видеосъемку.
6. Успешное развитие отрасли невозможно без тесного взаимодействия университетов и промышленности в области подготовки кадров, переподготовки специалистов и реализации инновационных проектов.
7. Активное совершенствование элементной базы ИКС 3-го поколения – создание ФПУ на основе КРТ, СКЯ, квантовых точек и суперрешеток с уменьшенным размером пиксела, разработка новых систем охлаждения, панорамной оптики и методов микросканирования – открывает новые возможности для повышения тактико-технических характеристик систем.
8. Разработка многоканальных и мультиспектральных систем технического зрения с высоким пространственным и спектральным разрешением является важнейшим направлением для экологического мониторинга, геологии, промышленной безопасности и оборонных применений. Комплексный подход, реализуемый в КТИПМ, позволяет создавать унифицированные приборы, не имеющие зарубежных аналогов.

Литература

1. Технология системного моделирования / под ред. С.В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.
2. Щепетов А.Г. Основы проектирования приборов и систем: учебник для вузов. – М.: Академия, 2011. – 368 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход. Учебник / Под ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Университетская книга, 2016. – 488 с.
4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
5. Инфракрасные системы 3-го поколения / Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г.; под общ. ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Логос, 2011. – 240 с.
6. Sood A.K., Richwine K., Puri Y.R. et al. Multispectral EO/IR sensor model for evaluating UV, visible, SWIR, MWIR and LWIR system performance // SPIE Proc., 2009. V. 7300, P. 73000H-1–12.
7. Патент РФ №2604898. Способ формирования спектрозональных видеосигналов / Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С. – 2016.
8. Сенник Б.Н., Калюгин В.С., Митрофанова Ю.С. Проблемные вопросы внедрения промышленного производства инновационных широкоспектральных оптико-электронных изделий // Тезисы докладов научно-практической конференции «Оптико-электронные приборы и комплексы». – Красногорск, 2017. – С. 8–9.
9. Бездидько С.Н. Развитие новых направлений вычислительной оптики, обеспечивающих существенное повышение эффективности проектирования оптических систем // Там же. – С. 17–18.
10. Бакланов А.И. Новые тенденции развития космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // Там же. – С. 19–30.
11. Барышников Н.В. Современные задачи взаимодействия университета с предприятиями оптико-электронной отрасли // Там же. – С. 10–11.
12. Patterson T.J., Chabries D.M., Christiansen R.W. Image processing for target detection using data from a staring mosaic infrared sensor geosynchronous orbit // Optical Engineering, 1986. V.25, №1. P.166-172.

13. Умбиталиев А.А., Пятков В.В., Цыцупин А.К., Левко Г.В., Морозов А.В. Оптико-электронная система измерений координат объектов с адаптацией параметров разложения // Измерительная техника, 2017, №4. С.42-45.
14. Демин А.В., Которский Н.С. Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 139 с.
15. Торшина И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. – М.: Университетская книга; Логос, 2009. – 248 с.
16. Бехтин Ю.С., Емельянов С.Г., Титов Д.В. Теоретические основы цифровой обработки изображений встраиваемых оптико-электронных систем. – М.: Аргатак-медиа, 2016. – 296 с.
17. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Фрактальные методы сегментации текстурных изображений // Известия вузов. Приборостроение, 2013, т.56, №5. – С.63-71.
18. Якушенков Ю.Г. Роль оптико-электронных технологий в современном мире // Лазер-Информ, 2014, №4 (523). – С. 3-5.
19. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Тенденции совершенствования элементной базы инфракрасных систем 3-го поколения // Известия вузов. Приборостроение, 2012. Т. 55, №5. – С. 56-64.
20. Breiter R., Ihle T., Wendler J. et al. MCT IR detection modules with 15 μm pitch for high reliability applications // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766039-1...11.
21. Melkonian L., Bangs J., Elizondo L. et al. Performance of MWIR and SWIR HgCdTe-based focal plane arrays at high operating temperatures // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602W-1...11.
22. Gordon N.T. Thermoelectrically cooled focal plane arrays based on MCT // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602X-1...8.
23. Gunapala S.D., Bandara S.V., Liu J.K. et al. Demonstration of 1024 $\times$ 1024 pixel dual-band QWIP focal plane array // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76603L-1...8.
24. Hood A., Evans A.J., Ikhlassi A. et al. LWIR high performance focal plane arrays based on type-II strained layer superlattices (SLS) materials // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601M-1...8.
25. Razeghi M., Huang E.K., Pour B.-M.N.S.A., Delaunay P.-Y. Type II antimonide-based superlattices for the third generation infrared focal plane arrays // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601F-1...14.
26. Battaglia J., Burzi V., Moyer B. et al. Parameterized nonuniformity corrections (NUC) for non-temperature stabilized InGaAs SWIR sensing // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76600J-1...12.
27. Klem E.J., Lewis J.S., Temple D. Multispectral UV-Vis-IR imaging using low-cost quantum dot technology // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602E-1...9.

28. Radebaugh R., Garaway I., Veprik A.M. Development of miniature, high frequency pulse tube cryocoolers // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602J-1...11.
29. Veprik A., Zehtzer S., Pundak N. Split Stirling linear cryogenic cooler for a new generation of high temperature infrared images // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602K-1...13.
30. Gordon N.T. Thermoelectrically cooled focal plane arrays based on MCT // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602X-1...11.
31. Le Noc L., Tremblay B., Martel A. et al. 1280×960 pixel microscanned infrared imaging module // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766021-1...10.
32. Donval A., Fisher T., Blecher G., Oron M. Dynamic sunlight filter (DSF) – a passive way to increase the dynamic range in visible and SWIR cameras // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 7660024-1...8.
33. Демьянов Э.А., Федоринин В.Н., Шлищевский В.Б. Разработка оптико-информационных технологий создания многоканальных и мультиспектральных систем технического зрения с высоким пространственным и спектральным разрешением.

SYSTEMS APPROACH TO THE DESIGN OF OPTOELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS: CURRENT STATE, CHALLENGES, AND PROSPECTS

Istomina N. L.

Moscow State University of Geodesy and Cartography

istomina@miigaik.ru

Abstract. This paper examines the key aspects of designing modern optoelectronic devices and systems (OEDS) based on the systems approach. The study analyzes current trends in the development of third-generation OEDS, including multispectral systems employing focal plane array detectors, spatial-temporal and adaptive filtering techniques, and intelligent image-processing algorithms. Particular attention is paid to the challenges associated with the industrial implementation of innovative broadband optoelectronic products, including issues in materials science, metrology, manufacturing technologies for aspheric and kinoform optical elements, coating technologies, and optical alignment. New directions in computational optics aimed at increasing the formalization and efficiency of the design process are also discussed. Special emphasis is placed on cooperation between universities and optoelectronic enterprises in personnel training and innovative research and development. The paper presents an analysis of global trends in the development of ultra-high-resolution Earth observation satellite systems. It provides a detailed overview of the spectral operating ranges of modern optoelectronic systems, the distinctive features of third-generation systems, active-passive optoelectronic systems, and the priority areas and technological trends shaping the future development of optoelectronic

instrumentation. The extended part of the paper also includes recent data on the development of photodetector technologies based on mercury cadmium telluride (MCT), strained quantum wells (SQWs), quantum dots, and superlattices, as well as advances in cooling systems, panoramic optics, microscanning techniques, and the development of multichannel and multispectral machine vision systems with high spatial and spectral resolution.

Keywords: optoelectronic devices and systems; systems approach; multispectral systems; adaptive filtering; computational optics; industrial technologies; Earth remote sensing; spectral ranges; third-generation optoelectronic systems; active-passive systems; photodetectors; cooling systems; panoramic optics; microscanning; multispectral systems; personnel training.

References

1. Emelyanov S. V. (Ed.), et al. Systems Modeling Technology. Moscow: Mashinostroenie; Berlin: Technik, 1988. 520 p.
2. Shchepetov A. G. Fundamentals of Instrument and System Design: A University Textbook. Moscow: Akademiya, 2011. 368 p.
3. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. Introduction to the Design of Optoelectronic Devices: A Systems Approach. Ed. by Yu. G. Yakushenkov. Moscow: Universitetskaya Kniga, 2016. 488 p.
4. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. Dual- and Multispectral Optoelectronic Systems with Focal Plane Array Detectors. Moscow: Universitetskaya Kniga; Logos, 2007. 192 p.
5. Tarasov V. V., Torshina I. P., Yakushenkov Yu. G. Third-Generation Infrared Systems. Ed. by Yu. G. Yakushenkov. Moscow: Logos, 2011. 240 p.
6. Sood A. K., Richwine K., Puri Y. R., et al. Multispectral EO/IR sensor model for evaluating UV, visible, SWIR, MWIR and LWIR system performance // Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 7300. P. 73000H-1–73000H-12.
7. Kovin S. D., Sagdullaev Yu. S. Method for Forming Spectral-Zone Video Signals. Russian Federation Patent No. 2604898. 2016.
8. Senik B. N., Kalyugin V. S., Mitrofanova Yu. S. Challenges in the industrial implementation of innovative broadband optoelectronic products // Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Optoelectronic Devices and Systems." Krasnogorsk, 2017. P. 8–9.
9. Bezdidko S. N. Development of new directions in computational optics for significantly improving the efficiency of optical system design // Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Optoelectronic Devices and Systems." Krasnogorsk, 2017. P. 17–18.
10. Baklanov A. I. New trends in the development of high-resolution spaceborne optoelectronic Earth observation systems // Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Optoelectronic Devices and Systems." Krasnogorsk, 2017. P. 19–30.

11. Baryshnikov N. V. Contemporary challenges in cooperation between universities and optoelectronic enterprises // Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Optoelectronic Devices and Systems." Krasnogorsk, 2017. P. 10–11.
12. Patterson T. J., Chabries D. M., Christiansen R. W. Image processing for target detection using data from a staring mosaic infrared sensor in geosynchronous orbit // Optical Engineering. 1986. Vol. 25. No. 1. P. 166–172.
13. Umbitaliev A. A., Pyatkov V. V., Tsytupin A. K., Levko G. V., Morozov A. V. Optoelectronic coordinate measurement system with adaptive decomposition parameters // Measurement Techniques. 2017. No. 4. P. 42–45.
14. Demin A. V., Kotorsky N. S. Simulation Modeling of Information-Measuring and Control Systems. St. Petersburg: ITMO University, 2007. 139 p.
15. Torshina I. P. Computer Modeling of Optoelectronic Primary Information Processing Systems. Moscow: Universitetskaya Kniga; Logos, 2009. 248 p.
16. Bekhtin Yu. S., Emelyanov S. G., Titov D. V. Theoretical Foundations of Digital Image Processing in Embedded Optoelectronic Systems. Moscow: Argamak-Media, 2016. 296 p.
17. Fisenko V. T., Fisenko T. Yu. Fractal methods for texture image segmentation // Journal of Instrument Engineering. 2013. Vol. 56. No. 5. P. 63–71.
18. Yakushenkov Yu. G. The role of optoelectronic technologies in the modern world // Laser-Inform. 2014. No. 4 (523). P. 3–5.
19. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. Trends in the development of the component base for third-generation infrared systems // Journal of Instrument Engineering. 2012. Vol. 55. No. 5. P. 56–64.
20. Breiter R., Ihle T., Wendler J., et al. MCT IR detection modules with 15 μm pitch for high reliability applications // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7660. P. 766039-1–766039-11.
21. Melkonian L., Bangs J., Elizondo L., et al. Performance of MWIR and SWIR HgCdTe-based focal plane arrays at high operating temperatures // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7660. P. 76602W-1–76602W-11.
22. Gordon N. T. Thermoelectrically cooled focal plane arrays based on MCT // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7660. P. 76602X-1–76602X-8.
23. Gunapala S. D., Bandara S. V., Liu J. K., et al. Demonstration of a 1024×1024 pixel dual-band QWIP focal plane array // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7660. P. 76603L-1–76603L-8.
24. Hood A., Evans A. J., Ikhlassi A., et al. LWIR high-performance focal plane arrays based on type-II strained-layer superlattice (SLS) materials // Proceedings of SPIE. 2010. Vol. 7660. P. 76601M-1–76601M-8.

25. Razeghi M., Huang E. K., Pour B.-M. N. S. A., Delaunay P.-Y. Type-II antimonide-based superlattices for third-generation infrared focal plane arrays // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7660. P. 76601F-1–76601F-14.
26. Battaglia J., Burzi V., Moyer B., et al. Parameterized nonuniformity corrections (NUC) for non-temperature-stabilized InGaAs SWIR sensing // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7660. P. 76600J-1–76600J-12.
27. Klem E. J., Lewis J. S., Temple D. Multispectral UV-Vis-IR imaging using low-cost quantum dot technology // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7660. P. 76602E-1–76602E-9.
28. Radebaugh R., Garaway I., Veprik A. M. Development of miniature high-frequency pulse tube cryocoolers // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7660. P. 76602J-1–76602J-11.
29. Veprik A., Zehtzer S., Pundak N. Split Stirling linear cryogenic cooler for a new generation of high-temperature infrared imagers // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7660. P. 76602K-1–76602K-13.
30. Gordon N. T. Thermoelectrically cooled focal plane arrays based on MCT // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7660. P. 76602X-1–76602X-11.
31. Le Noc L., Tremblay B., Martel A., et al. 1280×960 pixel microscanned infrared imaging module // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7660. P. 766021-1–766021-10.
32. Donval A., Fisher T., Blecher G., Oron M. Dynamic sunlight filter (DSF): A passive way to increase the dynamic range in visible and SWIR cameras // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7660. P. 766024-1–766024-8.
33. Demyanov E. A., Fedorinin V. N., Shlishevsky V. B. Development of Optical Information Technologies for Creating Multichannel and Multispectral Machine Vision Systems with High Spatial and Spectral Resolution.

УДК 321.01:35.07:101

ФИЛОСОФСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ, АКСИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ

Брюсов И. И. (независимый исследователь)

Аннотация. В статье анализируются фундаментальные философские проблемы современного российского государственного управления в контексте административных реформ, цифровой трансформации и поиска национальной модели управления. На основе синтеза классических подходов (М. Вебер, Н. Луман [6]) и современных исследований (Л. В. Сморгун [10], В. А. Юсупов [13], Т. В. Гуськова [3]) рассматриваются онтологические основания власти и управления, аксиологический вакуум и ценностный выбор, а также трансформация управленческих отношений под влиянием цифровизации. Особое внимание уделяется феномену «алгоритмической власти» (алгократии) и конституционно-правовым рискам внедрения искусственного интеллекта в публичное управление. Автор приходит к выводу, что эффективная модель государственного управления должна сочетать сильную государственную власть, социальное партнерство и культурно-цивилизационную идентичность России, при этом цифровая трансформация требует не только технологической, но и глубокой философско-правовой рефлексии.

Ключевые слова: государственное управление, философия управления, онтология, аксиология, алгократия, цифровая трансформация, искусственный интеллект, евразийство, социальное партнерство.

Введение

Современное состояние государственного управления в России характеризуется глубинными противоречиями. На протяжении нескольких последних десятилетий в стране идут перманентные административные реформы, однако их эффективность остается предметом острых дискуссий. Как справедливо отмечает О. Н. Диденко, «государственное управление как практическое явление имеет глубокие философские корни и основания, анализ которых даст новые возможности его современного понимания». Философский анализ государственного управления выводит на проблемы взаимоотношений государства и индивидов, культурно-цивилизационные предпосылки управления, соотношение власти и свободы, ответственного и разумного управления.

Актуальность философского осмысления государственного управления в современной России обусловлена несколькими факторами. Во-первых, в элитных кругах и научном сообществе активно обсуждаются доктрины социально-политического развития в условиях глобализации и

перехода российского социума в информационное состояние. Во-вторых, как подчеркивает Т. В. Гуськова [3], «основные причины неудач реформ кроются в ментальных особенностях российского социума, властных и корпоративных групп, формировавшихся в течение нескольких столетий». В-третьих, цифровая эра порождает новые технологии сетевого управления и риски замещения человека управляющими технологическими комплексами, что требует переосмысления самой природы власти и управления.

Настоящая статья представляет собой авторское осмысление актуальных работ на эту тему, дополненное анализом тенденций в области цифровизации государственного управления, включая конституционно-правовые риски внедрения искусственного интеллекта, проблему «алгоритмической власти», а также актуальные данные о состоянии административной реформы в Российской Федерации.

1. Теоретико-методологические основания философии государственного управления

1.1. Диалектика власти и управления

Дефиниции «власть» и «управление» достаточно глубоко и всесторонне исследуются в отечественной и зарубежной науке. Диалектика власти и управления такова, что без управления не раскрывается потенциал власти, а без власти не может быть реализовано управление. Однако само по себе только наличие власти еще не позволяет говорить об осуществлении управления: властью можно обладать, но при этом не управлять.

Как отмечает Т. В. Гуськова в своем диссертационном исследовании [3], государство всегда представляет собой специфический социальный институт, обладающий своими особенностями в деле производства, продвижения и реализации социально значимых целей. Выступая как институт регулирования общественных процессов, государство действует в разных поведенческих форматах. Однако все акции данного института могут быть представлены как продукты двух особых подсистем такой регулятивной деятельности: властно-политической и собственно-управленческой.

Наличие двух относительно самостоятельных подсистем принятия государственных решений показывает, что в едином процессе целеполагания существуют различные логики выработки ориентиров, особые механизмы согласования интересов, мотивации акторов и свои стратегии выработки позиций. В ходе продолжающейся уже несколько десятилетий теоретической дискуссии в нашей стране выработаны две базовые позиции в вопросе определения диалектики взаимодействия этих двух сфер. Одни ученые подтверждают наличие этих двух сфер как достаточно самостоятельных, другие предпочитают писать об их органической целостности.

Одним из вариантов решения обозначенной теоретической проблемы является предложение М. Вебера, касающееся организации и управления на уровне государства. Он считал, что

управление – это, во-первых, власть; во-вторых, управление – это служба, администрирование, без которого власть не может реализовать сформулированные политические цели. В реалиях современной российской политической системы соотношение между политическим и административным управлением характеризуется существенной взаимозависимостью и взаимодействием.



Рис. 1. Структура философии управления

1.2. Онтология государственного управления

По мнению В. А. Юсупова [13], онтология административного права раскрывает бытие административного права как системы и свидетельствует о длительном процессе её формирования и развития. Процесс становления административного права проходит ряд стадий или этапов: 1) зарождение объективной организационной потребности в упорядочивании социальных связей и отношений; 2) осознание этих потребностей как тех или иных организационных идей, планов, программ регламентации государственного управления; 3) формулирование проектов норм административного права; 4) возникновение на основе норм объективного административного права субъективных административных прав и обязанностей; 5) издание административных правоприменительных актов.

В современных условиях настоятельно необходимо дополнительное исследование онтологии государственного управления: пространственно-временных, динамических, структурно-функциональных характеристик, на основании которых мы можем сделать выводы о его действенности, действительности, эффективности. Государственное управление сегодня вынуждено осуществляться в рамках турбулентности окружающей среды. Можно сказать, что

государственное управление весьма часто есть управление хаосом, неопределенностью, непредсказуемостью развития социальных связей и отношений.

Наряду с этим, в западной философии распространены конструктивистские подходы к познанию бытия и мышления. С точки зрения Н. Лумана [6], общество всегда конструируется как социальная коммуникация, совокупность функционально разделенных систем, формально поддерживающих связи друг с другом. Общество является закрытой и аутопойетической системой, которая самостоятельно формируется через обмен и идентификацию его подсистем с окружающими другими подсистемами. Конструктивистские подходы нацелены на то, чтобы подчеркнуть, что современные процедуры и технологии государственного управления создаются человеком и направлены, прежде всего, на обеспечение защиты прав и свобод человека и гражданина.

1.3. Государственное управление как система

Государственное управление состоит как минимум из трех диалектически взаимосвязанных между собой подсистем:

- Управляющей системы, под которой понимается, как правило, государство (как определяющий субъект управления);
- Управляемой системы, которая соответствует общественной системе;
- Системы взаимодействия между государственной властью и обществом.

Главным результатом функционирования системы государственного управления, создающим эффект на выходе системы, являются управленческие решения и действия. Они могут носить политически общезначимый характер или представлять собой властные административные решения (в первую очередь, исполнительных органов власти). Эти решения могут касаться вопросов распределения или перераспределения собственности, государственного имущества, ценностей, ресурсов, укрепления правопорядка и законности, защиты прав и свобод граждан.

При этом важным является выполнение двух базовых требований. Во-первых, управленческие решения должны опережать и предопределять те или иные конкретные управленческие действия. Во-вторых, управляющая система может стабильно функционировать только как открытая система по признаку «вход – выход», когда каждому сигналу, поступающему на вход системы, соответствует отклик, выходной сигнал. Адекватность управления возможностям и запросам общества – это одна из закономерностей системы государственного управления. Ее нарушение всегда заметно обществу: управляющая система начинает работать на себя, бюрократия становится недоступной для общественного запроса, власть используется чиновниками для самих себя, а не для людей.

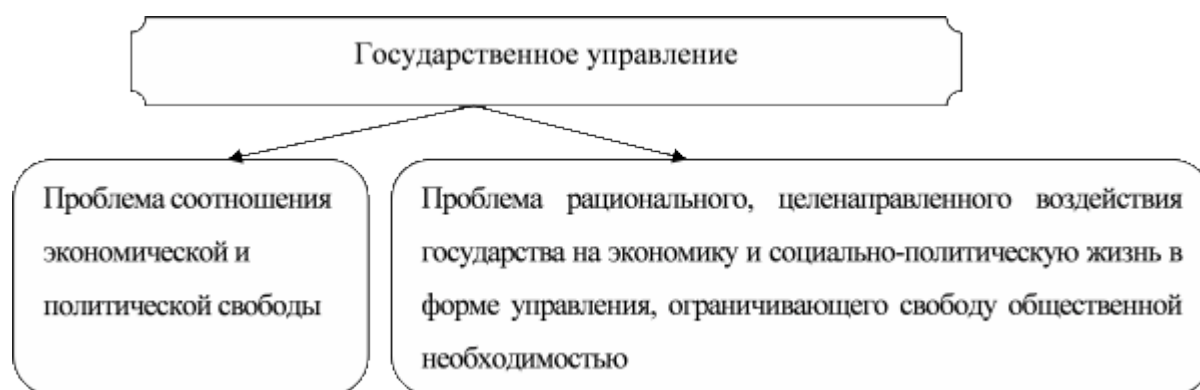


Рис. 2. Сущностные характеристики государственного управления

2. Аксиологические основания и ценностный выбор в государственном управлении

2.1. Проблема целеполагания

Четко сформулированная цель выступает обязательным условием для успешного развития всех институтов общества и государства. Именно заблаговременное императивное определение результата деятельности, который предполагается достичь в конечном итоге, придает процессу развития общества и его политической системы определенность, упорядоченность и целесообразность.

Как отмечает Т.В. Гуськова [3], в настоящее время довольно трудно оценить качество государственного управления в современной России с точки зрения его ориентированности на конечный результат. Ориентированность системы управления на результат предполагает изучение качества организации процессов и комплексность целеполагания, планирования и бюджетирования. Однако технологический подход к целеполаганию не удовлетворяет исследователя, поскольку тогда из системы государственного управления исключается властно-политическая составляющая, которую достаточно трудно учесть технологически, а без нее вряд ли получится эффективное целеполагание.

Любое целеполагание в системном управлении невозможно без ценностной точки отсчета. Цель потому и называется целью (и побуждает к ее достижению), что позволяет удовлетворить чьи-то интересы. При этом необходимо определить субъекты и объекты управления, сформулировать представление об инструментах, ресурсах и способах управления, сделать выбор и провести инвентаризацию имеющегося инструментария и его возможного дефицита.

Однако в настоящее время ценностные цели в нашей стране в большинстве своем неизвестны, поскольку они носят, как правило, институциональный характер. Более того, цели государственного управления определяются самими социально-политическими институтами или их руководством (а не наоборот, когда институты создаются под уже определенные цели). Тогда становится вполне понятным, что ценностные, высшие цели в нашей стране все еще неотличимы от средств и даже могут подменяться ими.

2.2. Ценности и культурная адаптация

Аксиология государственного управления строится на том, что государственное управление всегда ориентируется в процессе реализации на нравственные, культурные и политические ценности. Очевидно, что культурная адаптация так называемых общечеловеческих ценностей на национальной почве постоянно востребована, так как подтверждена мировой практикой.

Пример южнокорейского президента Пак Чон Хи, который сформулировал подход к национальной корейской философии государственного управления, показателен в этом отношении. Его подход выражается в двух положениях: во-первых, для слаборазвитых, преимущественно незападных стран механическое перенесение западных моделей демократии не имеет смысла, поскольку они не воспринимаются населением как легитимная политико-культурная ценность; во-вторых, для обеспечения восстановления и экономического роста страны необходима сильная авторитарная власть, которая, по его мнению, пользуется большей поддержкой населения [8].

В рамках перспектив развития современного российского государственного управления вновь встает вопрос о ценностных основаниях его осуществления и оценки эффективности. Нет сомнений, что этот вопрос особо актуален в эпоху, когда основная масса публичных коммуникаций осуществляется в сетевом пространстве. Данное публичное пространство формируется в процессе взаимодействия государства и основных экспертных сообществ по выработке общей согласованной позиции по острым и злободневным социальным проблемам. Формулирование же общего мнения происходит вокруг некоторой общей ценности, но при этом главный вопрос заключается именно в том, что считать соответствующей общественной ценностью: справедливость, гуманизм, безопасность и т.п. Четкого ответа на такой вопрос мы не получаем [4].

2.3. Евразийство как альтернативная философия управления

Одним из новых, а на самом деле хорошо «забытых», подходов является евразийство. Будучи в своей сути неоконсервативной моделью политического управления, евразийство направлено на умеренное совмещение общественного и индивидуального начал в управлении государством. С одной стороны, признаются свобода личности, идея народного представительства, традиционные ценности, а с другой, утверждаются сильная государственная власть, порядок, патриотизм, православное сознание, общественное мнение. Так как государственная власть в такой модели государственного управления приобретает сакральный характер, евразийство исходит из приоритета внутреннего нравственного содержания над внешней политико-правовой формой [12].

В условиях ограниченного встречного взаимодействия с «прозападной» дипломатической практикой и усиливающегося стратегического давления Россия пережила значительный сдвиг в идеологической парадигме. Как отмечается в современных исследованиях, евразийство эволюционировало от теоретического дискурса к практическому инструменту государственной

политики. На национальном уровне данный идеологический проект опирается на тройную критическую реконструкцию: систематическую критику европейского радикального индивидуализма; переоценку роли традиций государственного управления Монгольской империи в формировании российской государственности; а также генеалогический анализ элементов тюранской цивилизации, выявляющий нормативную функцию «философии подсознания» русского народа в формировании современных социальных норм.

На внешнем уровне евразийство инициирует парадигмальный сдвиг в геополитической ориентации России – от морской к континентальной – и выдвигает концепцию построения регионального экономического и безопасного сообщества с Россией в качестве стратегического узла. В конечном счёте данная модель направлена на структурный вызов однополярному мировому порядку под эгидой США и способствует формированию многополярной архитектуры глобальной власти.

Однако, как предупреждают некоторые авторы, в этой модели существует опасность подчинения личности государству через систему агрессивной суггестии. Кроме того, как отмечает философ Александр Дугин, традиционализм, лежащий в основе евразийской идеологии, глубоко противоречив и не способен ответить на все вызовы современности.

3. Модели государственного управления: от патронажа к социальному партнерству

В отношениях между государством и населением выделяются три основные модели: патронаж, сервис и партнерство. Сравнение этих моделей позволяет сделать вывод о различной роли государства по отношению к индивиду.

В случае патронажной модели управления государство выступает как опекун граждан, хранитель национальных традиций и производитель основных поведенческих моделей, поддержанных правовыми нормами и юридической ответственностью. От патронажной модели, особенно в связи с Советским государством, отказались в 1990-е годы в пользу либеральных политических и рыночных экономических концепций управления.

Сервисное государство предполагает активную роль граждан как потребителей и заказчиков определенных социально значимых публичных услуг, выразителей своих потребностей и интересов, а роль государства сводится к удовлетворению запрошенных населением публичных услуг. Однако реальность такова, что государство – это не только и не столько сервисная контора. Как отмечает Н. А. Кандрина [5], анализ текста Конституции РФ не дает основания для такого вывода.

Наиболее перспективной моделью государственного управления представляется концепция социального партнерства, основанная на паритете интересов сторон, конструктивном обсуждении спорных и неоднозначных позиций участников, всестороннем диалоге и созидательном творческом

взаимодействии партнеров. В подобном ракурсе философия управления дает возможность концептуально понять недостатки действующей системы управления, целостного понимания и многостороннего изучения практического управления, моделирования аксиологических установок и нормативных принципов эффективного поведения субъектов управленческих отношений [11].

4. Цифровая трансформация государственного управления: философские и правовые аспекты

4.1. Цифровизация как онтологический сдвиг

Цифровая трансформация является одним из серьезнейших вызовов для современного государственного управления. Цифровизация сегодня – это не модный тренд и даже не экономическая необходимость, а данность современного этапа развития общества и государства, его особенность в разрезе глобализации и технологического прогресса. В широком смысле под цифровизацией стоит понимать процесс переноса в цифровую среду функционирования всей триады: личность, общество и государство.

По данным на 2023–2024 годы, госсектор занимает значительную долю российского ИТ-рынка, при этом наблюдается рост бюджетных затрат на информатизацию при одновременном усилении требований к импортозамещению. Основными направлениями цифровой трансформации остаются импортозамещение (перешедшее в плановую фазу), внедрение элементов искусственного интеллекта в отдельные сферы госуправления и миграция на облачные платформы («Гостех», «Гособлако»). Происходит консолидация рынка: крупные ведомства отдают предпочтение одному подрядчику, что усложняет вход на рынок для малого и среднего бизнеса.

4.2. От электронного правительства к алгоритмической власти

Если в начале 2000-х годов исследователи питали надежды, что новой философской базой государственного управления станет минимизирующая государственное вмешательство в общество концепция «электронного правительства» [7], то годы спустя стало очевидно, что для реализации столь масштабных преобразований нужны серьезные финансовые, кадровые, инфраструктурные, правовые мероприятия, требующие наладки и отработки именно новой эффективной системы государственного управления.

Переход к «безбумажным» процессам уже не новость; новость в другом: данные становятся инфраструктурой политики. Качественный реестр, единые справочники, сквозная аналитика, оценка эффектов на основе доказательств – это основа для адресных мер, которые не распыляют ресурсы. Доля граждан, использующих портал «Госуслуги», по итогам 2023 года превысила 85 %, а уровень удовлетворённости качеством государственных услуг достиг рекордных значений.

Однако цифровая трансформация предполагает не просто перевод существующих процессов в электронную форму, а их глубокий реинжиниринг – изменение самой логики

административных процедур. В этом контексте особую актуальность приобретает феномен «алгоритмической власти» (алгократии). Современные исследователи, развивая идеи М. Фуко, вводят понятие «алгоритмического управления» или «алгоритмической власти». Алгоритмы заменяют собой бюрократические и административные системы, создавая новые формы цифрового паноптизма, в рамках которого наблюдение осуществляется не централизованно, а распределенно, через сбор и обработку больших массивов данных.

В отличие от классического паноптика, описанного М. Фуко, современное наблюдение не требует тюрьмы или сторожевой башни. Каждый пользователь становится соучастником алгоритмического контроля, добровольно отдавая информацию о себе в обмен на удобство, персонализацию и участие в цифровом обществе. Цифровая эпоха поставила перед философией власти и субъективности новые вызовы, обусловленные тем, что контроль над поведением, восприятием и идентичностью человека все чаще осуществляется не через классические институты (государство, церковь, семью), а через невидимые, автоматизированные структуры (алгоритмы).

4.3. Конституционно-правовые риски цифровизации

Процессы цифровизации государственного управления сопряжены с возможным возникновением конституционно-правовых рисков. Как отмечается в современных исследованиях, основными такими рисками являются:

- неоднозначность распределения бремени ответственности при использовании беспилотных аппаратов и автоматизированных механизмов;
- нарушение права на неприкосновенность частной жизни и защиту персональных данных;
- риск дискриминации при использовании алгоритмов искусственного интеллекта;
- формирование цифрового неравенства;
- угроза цифровому суверенитету государства.

Скорость, непредсказуемость и многофакторность происходящих изменений требуют создания более гибкой системы государственного управления в целях минимизации конституционно-правовых рисков.

4.4. Искусственный интеллект в государственном управлении: возможности и границы

Внедрение искусственного интеллекта в государственное управление рассматривается как стратегически важный шаг к повышению эффективности государственного управления, оптимизации ресурсного обеспечения и улучшения качества предоставляемых услуг. ИИ успешно применяется в различных сферах – от анализа больших объемов данных для выявления социальных проблем до автоматизации рутинных операций и поддержки принятия обоснованных решений.

Однако использование ИИ в государственном секторе сопряжено с рядом значительных рисков, среди которых выделяются потенциальная дискриминация, угрозы правам человека и недостаточная прозрачность механизмов принятия решений. Для минимизации этих вызовов необходимо разработать четкие рекомендации, направленные на создание подотчетных систем ИИ, соответствующих как действующим правовым нормам, так и этическим стандартам.

Особую тревогу вызывает применение генеративного ИИ в государственном управлении. Значительная часть стека российского генеративного ИИ вторична и основана на зарубежных разработках – фреймворках, дата-сетах и движках LLM. Многие популярные модели размещены на облачных ресурсах, также иностранных. Как следствие, существует риск утечки данных, обрабатываемых такими системами, их иностранным разработчикам.

Кроме того, генеративные модели обучаются на неизвестном наборе данных – десятках терабайт информации, порой вторичной и некачественной. Они работают как «черный ящик» – результат их работы непредсказуем даже для разработчика. Иностранные модели базируются на ценностях, идеях и политической повестке, свойственной стране-разработчику. Исторические факты искажаются, а в «философию» самой системы закладывается идея превосходства набора принципов страны-разработчика. В некоторых западных ИИ-моделях встречаются деструктивные по отношению к традиционным ценностям концепты и антироссийские нарративы.

Не менее значимы и когнитивные риски: привыкнув к использованию генеративного ИИ, человек попадает в когнитивную ловушку. Теряется критическое мышление и способность концентрировать внимание на одной задаче, появляется риск потери компетенций, сужения кругозора, такой человек в большей степени перекладывает ответственность на нейросеть.

4.5. Прозрачность и подотчетность автоматизированных решений

В условиях активного внедрения автоматизированных систем принятия решений и систем искусственного интеллекта в деятельность органов публичной власти актуализируется проблема поддержания надлежащего уровня прозрачности государственного управления, имеющая критическое значение для соблюдения принципов верховенства права и защиты фундаментальных прав граждан.

Ключевыми механизмами обеспечения прозрачности являются: раскрытие порядка или логики принятия решений, «право на объяснение», контрфактологические объяснения, раскрытие данных и программного кода/модели, аудит и общественный контроль, информирование о применении автоматизированных систем.

Следующий шаг цифровой трансформации – внедрение искусственного интеллекта в типовые решения: от обработки обращений до прогнозирования потребностей в социальных услугах. Но перспектива здесь будет зависеть от трёх условий: прозрачности алгоритмов, защиты

персональных данных и готовности чиновника отвечать за итог, а не «списывать» его на модель. Иначе цифровизация превратится в новый вид бюрократии.

5. Современные проблемы административной реформы в России

5.1. Итоги и противоречия реформирования

Фактически в 2003 году в России началась административная реформа, суть которой заключалась в комплексной трансформации системы органов государственного управления с целью обеспечения их большей гибкости и эффективности. Однако ее первый этап (2003–2004 гг.) был оценен неоднозначно. Даже в октябре 2005 года (после формального окончания административной реформы) Правительство РФ отмечало, что «сфера государственного управления превратилась в ограничивающий фактор для социально-экономического развития страны и повышения ее мировой конкурентоспособности».

Согласно индексу GRICS (Governance Research Indicator Country Snapshot), который определяется один раз в 2 года Всемирным Банком и оценивает эффективность государственного управления в 209 странах, Россия по таким показателям, как эффективность работы правительства, качество законодательства, верховенство закона и контроль за коррупцией, традиционно находится в нижней части этого рейтинга.

В 2024 году реформа государственного управления продолжилась, однако ее характер претерпел существенные изменения. В частности, активно обсуждается и внедряется одноуровневая система местного самоуправления. По данным на начало 2024 года, ряд регионов перешел на одноуровневую систему, что, по мнению одних экспертов, направлено на повышение эффективности управления, а по мнению других – является классическим примером того, как «телегу ставят впереди лошади».

5.2. Основные организационные проблемы

Как отмечают Е. В. Сеницына, Е. Е. Тощева и Л. А. Хливнюк [9], основными организационными проблемами государственного управления в России являются:

1. Недостаточный уровень образования и квалификации государственных служащих. У большинства сотрудников нет профессионального образования по профилю работы, несмотря на то что степень ответственности, важности и уровень требований в системе государственного управления требуют этого.
2. Компенсация непрофессионализма сотрудников государственного управления их количеством – не столько физическое увеличение штата, сколько неудачное соотношение элементов управленческой вертикали, прежде всего рост среднего звена.
3. Недостаточно проработанное нормативно-правовое обеспечение государственного управления.

4. Коррупция – подкуп, продажность общественных и политических деятелей, государственных чиновников и должностных лиц. Главной целью борьбы с коррупцией должны стать меры, которые могли бы изменить отношения общественности к коррупции при помощи формирования обстановки ее непринятия и создания условий, препятствующих ей.

5. Недоработка вертикали власти в стране, многие вопросы взаимодействия федеральных органов управления и субъектов РФ остаются спорными.

5.3. Инструментарий реформирования: технологический, институциональный, кадровый

Процессы реформирования государственного аппарата рассматриваются как использование определенных наборов инструментов, которые подразделяются на «технологический», «институциональный» и «кадровый» виды.

«Технологический» инструментарий подразумевает набор управленческих технологий, совершенствующих внутреннюю работу органов власти, но не затрагивающих уровень и качество политических решений. Под данными инструментами понимается перенос управленческих технологий бизнеса, например, таких как планирование, управление кадрами, бизнес-процессами, в практику государственного управления.

«Институциональный» инструментарий включает в себя создание институтов, с помощью которых общество сможет участвовать в процессах подготовки и принятия государственных управленческих решений, корректировки принимаемых решений и процедур их реализации, а также формировать механизмы обратной связи. При использовании данных инструментов государственные чиновники начинают восприниматься как «наемные менеджеры», увеличивается влияние организованных групп гражданского общества на различные политические решения.

«Кадровый» инструментарий традиционен для административной системы России и представляет собой ее поддержку путем назначения руководителей, способных работать с уже существующей командой и обладающих конкретными поставленными задачами развития сферы, подконтрольной им.

Показательно, что страны, представляющие собой пример лучшей практики государственного управления, сначала полностью использовали «технологический» подход, и уже после переориентировались на развитие «институтов», формируя и поддерживая обратную связь с обществом. Нынешний этап административной реформы РФ направлен на «технологический» подход, что является шагом вперед, однако на практике все так же часто применяют «кадровые» решения [10].

6. Социальное партнерство и участие общественности

Государственное управление не синонимично управлению со стороны государства, а должно включать в себя и общественное управление. Соотношение между управлением со стороны государственного аппарата и управленческими возможностями тех или иных структур, представляющих интересы иных социальных групп (не бюрократии), в различных социумах бывает различным. Мера участия общества в государственном управлении довольно сильно влияет на дальнейшее социально-экономическое развитие страны, и эффективное государственное управление немыслимо без разветвленной институциональной системы социального партнерства.

Мера участия аппарата и общественности в государственном управлении зависит, как отмечает Т. В. Гуськова [2], от характера и содержания того социального контракта, который оформляется между обществом и властью. Там, где гражданское общество было сильнее, возникала горизонтальная схема общественного договора. При этом общество просто распространяло свое устройство на свои отношения с властью. Там же, где гражданское общество оказывалось слабее, государство становилось монополистом и в последующем монополизировало все общество.

В [3] выделены пять базовых проблем участия общественности в государственном управлении:

- Не преодолены последствия командно-административной модели управления.
- Не до конца решен вопрос реального верховенства федеральной Конституции.
- Выдвижение в России новых лидеров для системы государственного управления носит закрытый от общества характер.
- Пока отсутствуют эффективные органы контроля и аудита за работой государственного аппарата.
- Фактически отсутствует система парламентского контроля за деятельностью правительства Российской Федерации.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что государственное управление в современной России представляет собой сложный, многоаспектный феномен, требующий глубокого философского осмысления. Поверхностное заимствование западных моделей, будь то концепции «нового государственного менеджмента» или «электронного правительства», нередко приводит к методологической фрустрации и не дает ожидаемых результатов.

Перспективным направлением является интеграция онтологического, аксиологического и культурно-цивилизационного подходов, обращение к национально-культурным философским корням (в том числе к идеям евразийства) при одновременном учете вызовов цифровой эпохи. Формирование эффективной системы управления должно базироваться не на слепом копировании

чужих шаблонов, а на выработке собственной национальной модели, сочетающей сильную государственную власть, социальное партнерство и уважение к правам и свободам личности.

Цифровая трансформация государственного управления, будучи объективной реальностью современного этапа развития общества и государства, требует не только технологической, но и глубокой правовой и философской рефлексии. Основными конституционно-правовыми рисками цифровизации являются: неоднозначность распределения бремени ответственности, нарушение права на неприкосновенность частной жизни, риск дискриминации при использовании алгоритмов ИИ, цифровое неравенство и угроза цифровому суверенитету. Внедрение искусственного интеллекта в государственное управление должно сопровождаться созданием прозрачных и подотчетных систем, внедрением этических принципов и разработкой механизмов объяснимости принимаемых решений.

Особую тревогу вызывает использование генеративного ИИ, основанного на иностранных разработках и несущего угрозу утечки данных, когнитивных ловушек и потери критического мышления у государственных служащих. Применение подобных систем в госуправлении должно быть жестко ограничено.

Участие российской общественности и граждан в государственном управлении остается проблемной областью. Необходимо создание эффективных органов контроля и аудита за работой государственного аппарата, системы парламентского контроля за деятельностью правительства, а также обеспечение реального верховенства федеральной Конституции [3].

Авторские выводы могут быть использованы для углубления изучения курсов социальной философии, философии и теории права, административного права, а также для оптимизации деятельности органов государственной власти, политических партий, экспертного сообщества и общественных организаций по реорганизации и формированию эффективной системы государственного управления в современной Российской Федерации.

Литература

1. Васильев Г. Е. Личностная философия власти и управления. Часть 2. Управление // Вопросы культурологии. – 2009. – № 12. – С. 67–71.
2. Гуськова Т. В. Становится ли государственное управление в России сетевым? // Российская муниципальная реформа и развития местного в Смоленской области: Материалы международной научно-практической конференции (14–15 мая 2008 г.). – СПб.: Изд-во СПб. академии управления и экономики, 2008. – С. 115–120.
3. Гуськова Т. В. Что происходит с российской системой государственного управления? // Власть. – 2008. – № 6. – С. 41–43.

4. Зотов В. В. От нового государственного управления к государственному менеджменту публичных ценностей (новая философия публичного управления) // Проблемы философии: история и современность: сборник статей по итогам научно-практической конференции с международным участием (Курск, 18–21 мая 2018 года). – Курск: Изд-во Курского государственного университета, 2018. – 230 с.
5. Кандрина Н. А. Государственные услуги в системе современного российского государственного управления // Российско-азиатский правовой журнал. – 2019. – № 1. – С. 24–27.
6. Луман Н. Общество общества / пер. с нем. А. Антоновского. – М.: Издательство «Логос», 2011. – 640 с.
7. Нисневич Ю. А. «Электронное правительство» как постиндустриальная философия государственного управления // Теория и практика общественно-научной информации. – 2004. – № 19. – С. 153–170.
8. Пак Ч. Х., Соколов А. В., Чже С. Х. Философия государственного управления Пак Чжон Хи // Вопросы философии. – 2016. – № 6. – С. 38–45.
9. Синицына Е. В., Тощева Е. Е., Хливнюк Л. А. Проблемы государственного управления в Российской Федерации // Мировые цивилизации. – 2022. – Т. 7. – № 3.
10. Сморгунов Л. В. Современные тенденции в государственном управлении: от нового государственного менеджмента к управлению публичной политикой // Политическая наука. – 2022. – № 3. – С. 100–121.
11. Халеев Р. В., Рачковский А. А. Философия управления как одно из перспективных направлений развития практической философии // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – № 5–4. – С. 71–73.
12. Шишкова А. В. Неоконсервативная модель государственного управления в философии евразийства // Контекст и рефлексия: философия о мире и человеке. – 2019. – Т. 8. – № 1А. – С. 114–125.
13. Юсупов В. А. Теория административного права. – М.: Евразийская академия административных наук, 2012. – 780 с.

PHILOSOPHICAL PROBLEMS OF PUBLIC ADMINISTRATION IN CONTEMPORARY RUSSIA: ONTOLOGICAL, AXIOLOGICAL, AND TECHNOLOGICAL CHALLENGES

Bryusov I. I. (*Independent Researcher*)

Abstract. The article examines the fundamental philosophical problems of contemporary public administration in Russia in the context of administrative reforms, digital transformation, and the search for

a national model of governance. Drawing on a synthesis of classical approaches (M. Weber, N. Luhmann [6]) and contemporary studies (L. V. Smorgunov [10], V. A. Yusupov [13], T. V. Guskova [3]), the paper explores the ontological foundations of power and governance, the axiological vacuum and the problem of value choice, as well as the transformation of governance relations under the influence of digitalization. Particular attention is paid to the phenomenon of algorithmic governance (algocracy) and the constitutional and legal risks associated with the introduction of artificial intelligence into public administration. The author concludes that an effective model of public administration should combine a strong state, social partnership, and Russia's cultural and civilizational identity, while digital transformation requires not only technological modernization but also profound philosophical and legal reflection.

Keywords: public administration, philosophy of governance, ontology, axiology, algocracy, digital transformation, artificial intelligence, Eurasianism, social partnership.

References

1. Vasiliev G. E. Lichnostnaya filosofiya vlasti i upravleniya. Chast' 2. Upravlenie [Personal Philosophy of Power and Governance. Part 2. Governance]. *Voprosy Kul'turologii* (Issues of Cultural Studies), 2009, no. 12, pp. 67–71.
2. Guskova T. V. Stanovitsya li gosudarstvennoe upravlenie v Rossii setevym? [Is Public Administration in Russia Becoming Network-Based?]. In: *Rossiyskaya munitsipal'naya reforma i razvitie mestnogo samoupravleniya v Smolenskoj oblasti: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Russian Municipal Reform and the Development of Local Self-Government in the Smolensk Region: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference] (May 14–15, 2008). St. Petersburg: St. Petersburg Academy of Management and Economics Publ., 2008, pp. 115–120.
3. Guskova T. V. Chto proiskhodit s rossiyskoi sistemoi gosudarstvennogo upravleniya? [What Is Happening to the Russian Public Administration System?]. *Vlast'* (Power), 2008, no. 6, pp. 41–43.
4. Zotov V. V. Ot novogo gosudarstvennogo upravleniya k gosudarstvennomu menedzhmentu publichnykh tsennostei (novaya filosofiya publichnogo upravleniya) [From New Public Management to Public Value Management (A New Philosophy of Public Governance)]. In: *Problemy filosofii: istoriya i sovremennost': sbornik statei po itogam nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Problems of Philosophy: History and Modernity: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Kursk: Kursk State University Publ., 2018. 230 p.
5. Kandrina N. A. Gosudarstvennye uslugi v sisteme sovremennogo rossiyskogo gosudarstvennogo upravleniya [Public Services in the System of Contemporary Russian Public

Administration]. *Rossiysko-Aziatskii Pravovoi Zhurnal* (Russian-Asian Law Journal), 2019, no. 1, pp. 24–27.

6. Luhmann N. *The Society of Society*. Translated from German by A. Antonovsky. Moscow: Logos Publ., 2011. 640 p.

7. Nisnevich Yu. A. "Elektronnoe pravitel'stvo" kak postindustrial'naya filosofiya gosudarstvennogo upravleniya ["Electronic Government" as a Post-Industrial Philosophy of Public Administration]. *Teoriya i praktika obshchestvenno-nauchnoi informatsii* (Theory and Practice of Social Science Information), 2004, no. 19, pp. 153–170.

8. Pak Ch. H., Sokolov A. V., Chzhe S. H. *Filosofiya gosudarstvennogo upravleniya Pak Chzhon Khi* [Park Chung Hee's Philosophy of Public Administration]. *Voprosy Filosofii* (Problems of Philosophy), 2016, no. 6, pp. 38–45.

9. Sinitsyna E. V., Toshcheva E. E., Khlivnyuk L. A. *Problemy gosudarstvennogo upravleniya v Rossiyskoi Federatsii* [Problems of Public Administration in the Russian Federation]. *Mirovye Tsivilizatsii* (World Civilizations), 2022, vol. 7, no. 3.

10. Smorgunov L. V. *Sovremennye tendentsii v gosudarstvennom upravlenii: ot novogo gosudarstvennogo menedzhmenta k upravleniyu publichnoi politikoi* [Contemporary Trends in Public Administration: From New Public Management to Public Policy Governance]. *Politicheskaya Nauka* (Political Science), 2022, no. 3, pp. 100–121.

11. Khaleev R. V., Rachkovsky A. A. *Filosofiya upravleniya kak odno iz perspektivnykh napravlenii razvitiya prakticheskoi filosofii* [The Philosophy of Governance as One of the Promising Directions in the Development of Practical Philosophy]. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Gumanitarnykh i Estestvennykh Nauk* (International Journal of Humanities and Natural Sciences), 2019, no. 5–4, pp. 71–73.

12. Shishkova A. V. *Neokonservativnaya model' gosudarstvennogo upravleniya v filosofii evraziistva* [The Neoconservative Model of Public Administration in the Philosophy of Eurasianism]. *Kontekst i Refleksiya: Filosofiya o Mire i Cheloveke* (Context and Reflection: Philosophy of the World and Human Being), 2019, vol. 8, no. 1A, pp. 114–125.

13. Yusupov V. A. *Teoriya administrativnogo prava* [Theory of Administrative Law]. Moscow: Eurasian Academy of Administrative Sciences, 2012. 780 p.

Уважаемые Авторы!

Общие рекомендации по оформлению рукописей:

1. При подготовке электронной версии материалов используется редактор Microsoft Word for Windows.
2. Для файла статьи используется формат *.doc, *.docx.
3. Рисунки, формулы, таблицы и схемы располагаются по месту в тексте статьи. В виде отдельных файлов в формате .jpg наилучшего качества предоставляются рисунки и схемы. Названия файлов должны соответствовать нумерации и названиям соответствующих рисунков и схем в статье.
4. Статья не должна превышать объем более 20 стр. (свыше 20 стр. - по согласованию с редакцией), включая рисунки, схемы, таблицы и т.п.
5. При наборе используются **Times New Roman, 12, полуторный интервал, поля со всех сторон - 2,5 см. Отступ красной строки 1,25.**
6. При наборе текста используется только русский или английский языки без смешения русских и латинских букв в одном слове.
7. Таблицы создаются с использованием только редактора Word или Excel.
8. Формулы следует нумеровать в круглых скобках (например, (2)).
9. Библиографические ссылки оформляют по ГОСТ Р 7.9.5-2008, в тексте статьи заключают в квадратные скобки (например, [2]).

Файл рукописи должен включать в себя:

1. **УДК**
2. **ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ** на русском и перевод на английский язык. Заглавие должно быть информативным; в заглавии статьи можно использовать только общепринятые сокращения; в переводе заглавия на английский язык допускается транслитерация с русского языка только непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов, имеющих собственные названия.
3. **Фамилия, имя, отчество** автора (авторов) на русском и английском языках. Указывается ученая степень, звание и должность автора.
4. **Адресные сведения авторов**, включающие электронный адрес для переписки, телефон для оперативной связи, наименование организации (ведомства), город и страну. Также дается официальное наименование организации на английском языке.
5. **Аннотация** на русском и английском языках. Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть не менее 100-250 слов.
6. **Ключевые слова** на русском и английском языках.
7. **Текст статьи.**
8. Пристатейный **список литературы** должен быть представлен двумя вариантами для русскоязычного и англоязычного блока. Для русскоязычного блока список приводится в следующем порядке: сначала источники на русском языке в алфавитном порядке (оформление согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008), затем англоязычные источники также в алфавитном порядке, затем ссылки на интернет-источники в порядке появления в тексте, например:
 1. Кравцов В.А. Массы атомов и энергии связи ядер. -М.: Атомиздат, 1974. -344 с.
 2. Магницкий Н.А. Теория сжимаемого осциллирующего эфира// Сложные системы. - 2018. -№ 4 (29). - С. 4-24.
 3. Magnitskii N.A. Theory of compressible oscillating ether // Results in Physics. - 2019. - No. 12. - P. 1436-1445.
 4. URL: <https://periodictable.com/Isotopes/> (дата обращения 01.08.2019).
9. Для англоязычного блока (**References**) сохраняется та же нумерация, что и в русскоязычном блоке, при этом источники на русском языке должны быть представлены в романском алфавите (при транслитерации используется стандарт **Board of Geographic Names (BGN)** с помощью программы <https://translit.ru/ru/Bgn/>) с переводом названия статьи и источника,

приведенными в квадратных скобках, например:

1. Kravtsov У.А. Massy atomov i energii svyazi yader [Оригинальный перевод названия на англ.яз]. М.: Atomizdat. 1974. 344 p.

2. Magnitskii N.A. Teoriya szhimayemogo ostsilliruyushchego efira [Оригинальный перевод названия статьи на англ.яз]. *Slozhnyye systemy [The complex systems]*. 2018. No. 4 (29). P. 4-24.

3. Magnitskii N.A. Theory of compressible oscillating ether. *Results in Physics*. 2019. No. 12. P. 1436-

1445.

4. URL: <https://periodictable.com/Isotopes/> (appeal date 01.08.2019).

Англоязычный блок полностью (название статьи, ФИО автора, официальное наименование организации, аннотация, ключевые слова, ссылки) размещается после текста статьи на русском языке.

Желаем плодотворной работы!

Подписано в печать 04.06.2024
Формат А4. Бумага офсетная.
Печать цифровая.
Тираж 50 экз. Цена договорная.
Отпечатано в типографии ООО РПК «ВАШ ФОРМАТ»
Адрес: 119071, Москва, ул. Малая Калужская, 15
Тел. 7 (495) 749-45-84