

Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности

Алексей Галахов

В статье приводятся экспериментальные данные импульсной компоненты естественного электромагнитного поля ОНЧ-диапазона (И.К. Э-М. П.), зарегистрированного на авроральной обсерватории ПГИ Баренцбург (78,08°, 14,2°; арх. Шпицберген), магнитограмм геомагнитного поля Земли, полученных на норвежской авроральной станции LYR TGO (78,20°, 15,82°; арх. Шпицберген), и сейсмические данные норвежской сети NORSAR.

В качестве примера приведены синхронные записи двух массивов 01-10.11.2019 и 01-10.11.2021 экспериментальных данных И.К. Э-М. П., магнитограмм земного поля, которые сопоставляются во времени с моментами начала землетрясений.

Высказано предположение, что рассматриваемые импульсные излучения, которые значительно (в 3–9 раз) превосходят по амплитуде поле атмосфериков, являются результатом сейсмических событий (пьезоэлектрический эффект).

В качестве приёмно-регистрирующей аппаратуры использованы два приёмника ОНЧ-диапазона (400...7500 Гц) со взаимно ортогональным расположением приёмных рамочных антенн и последовательный анализатор спектра импульсных сигналов. Аппаратура была разработана в ПГИ (г. Апатиты), выполнена на основе программируемых аналоговых (AN221E04) и цифровых (PIC18F452) интегральных микросхем. Данная структура построения аппаратуры дала возможность реализовать режим динамической реконфигурации ПАИС, что позволило в реальном времени менять функциональную схему устройства и его технические характеристики, тем самым получать высокую точность и стабильность результатов обработки исследуемых сигналов.

Работа, основанная на результатах обработки архивных экспериментальных данных импульсной компоненты электромагнитного поля (И.К. Э-М. П.), полученных на авроральной обсерватории ПГИ Баренцбург (78,08°, 14,2°; арх. Шпицберген), магнитограммах норвежской станции LYR TGO (78,20°, 15,82°; арх. Шпицберген) и календаря сейсмических событий норвежской сети NORSAR [<https://www.norsar.no/extranet/bulletins/>] для района с координатами (68±10°, 14±10°), является продолжением тематики изучения влияния гелиогеофизических факторов на амплитудно-частотные характеристики естественного электромагнитного поля ОНЧ-диапазона.

Многие авторы рассматривают грозовой генератор основным источником естественного шумового элек-

тромагнитного поля в широком диапазоне частот: поля атмосфериков [1]. Поле атмосфериков – это сигнал, формируемый спектром излучаемых молнией электромагнитных волн, который имеет интерференционный характер, обусловленный суперпозицией прямой волны, распространяющейся вдоль поверхности Земли, и волн, отражённых от ионосферы.

Спектральные характеристики поля атмосфериков (П.А.) позволяют получать информацию как о свойствах распространения радиоволн, входящих в их спектр, так и о свойствах среды распространения сигнала, какой является волновод Земля – ионосфера [2].

Если в предыдущих работах [8–12] были представлены экспериментальные данные характеристик поля атмосфериков, подтверждающие

зависимость влияния таких факторов, как: солнечная активность (корональные выбросы, широкополосное электромагнитное излучение), галактические космические лучи, вариации магнитного поля Земли на АЧХ П.А., то в данной статье приведены примеры регистрации импульсных излучений ОНЧ-диапазона, значительно превосходящих по амплитуде (в 3–9 раз) поле атмосфериков. В качестве показателя, характеризующего геофизическую активность среды в точке приёма сигналов, использованы магнитограммы магнитного поля Земли.

Аппаратура

Для оценки пространственной избирательности сигнала приём осуществлялся на два приёмника ОНЧ-диапазона (400...7500 Гц) с ортогональных направлений N_x-N_y на магнитные рамочные антенны, включённые по схеме с симметричным входом в режиме преобразователя тока в напряжение [3, 4].

В качестве регистратора сигнала использован последовательный анализатор спектра импульсного сигнала ОНЧ-диапазона 400...3600 Гц [5, 6, 7].

Аппаратура была разработана в ПГИ (г. Апатиты) и выполнена на основе программируемых аналоговых (Anadigm, AN221E04) и цифровых (PIC18F452) интегральных микросхем, что позволило получить высокие технические характеристики и использовать режим динамической реконфигурации ПАИС для изменения структурной схемы последовательного анализатора спектра [6, 7].

Выбор ПАИС Anadigm обусловлен его высокими техническими характеристиками:

- низкий уровень собственных шумов ($U_{\text{сш}} = 0,13 \text{ мкВ}/\sqrt{\Gamma\text{Г}}$);
- высокая точность обработки аналогового сигнала, где, в отличие от

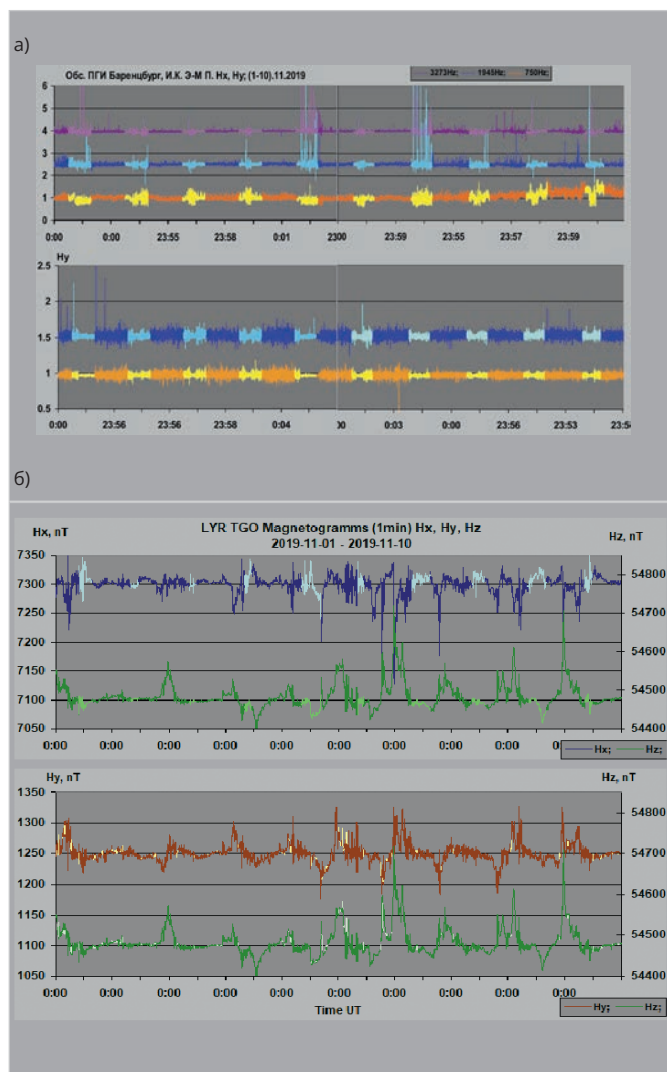


Рис. 1. Синхронная запись АЧХ И.К. Э-М. П. и магнитного поля Земли, период записи [01.11.2019–10.11.2019]: а) АЧХ И.К. Э-М. П. [Hx, Hy]; б) магнитограммы [Hx, Hy, Hz] поля Земли

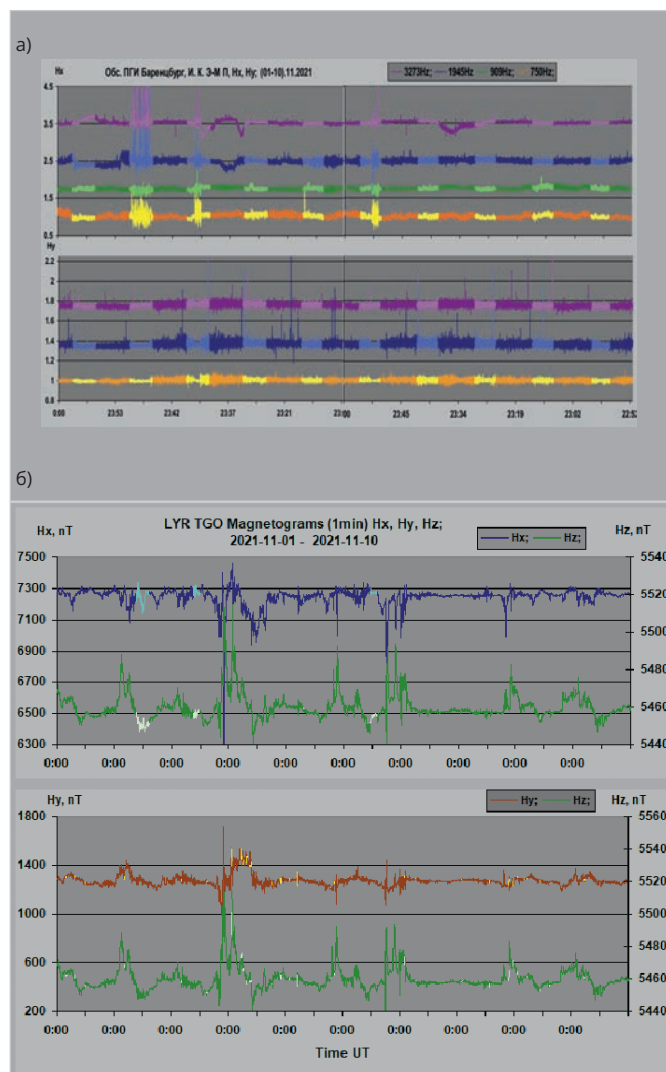


Рис. 2. Синхронная запись АЧХ И.К. Э-М. П. и магнитного поля Земли, период записи [01.11.2021–10.11.2021]: а) АЧХ И.К. Э-М. П. [Hx, Hy]; б) магнитограммы [Hx, Hy, Hz] поля Земли

цифровых систем, в дискретно-аналоговых системах сигнал дискретен только во времени;

- наличие на входах ПАИС anti-aliasing – фильтров, построенных на дискретных элементах, устраняет эффект паразитного наложения спектра.

Основные характеристики последовательного анализатора спектра:

- частотный диапазон анализа $\Delta F = 600...3600$ Гц;
- значения резонансных частот перестраиваемого фильтра в Гц: 613, 750, 909, 1050, 1204, 1350, 1500, 1650, 1795, 1945, 2091, 2200, 2386, 2682, 2978, 3273, 3601;
- полоса пропускания анализирующего фильтра выбрана с учётом средней длительности атмосферика ($t \sim 5$ мс) и составляет $2\Delta F_{0,7} = 200$ Гц;
- коэффициент прямоугольности АЧХ фильтра: $K_{0,1} = 2\Delta F_{0,7}/2\Delta F_{0,1} = 0,32$, $K_{0,01} = 2\Delta F_{0,7}/2\Delta F_{0,01} = 0,1$;

- длительность цикла последовательного анализа: $T_a = 25,5$ с.

Режим динамической реконфигурации, реализованный в ПАИС Anadigm, позволяет в реальном времени использовать подпрограмму «обнуления», чтобы уменьшить погрешность измерения амплитуды из-за эффекта «звона» фильтра при действии входного импульсного сигнала. В режиме «обнуления» после каждой записи спектральной составляющей сигнала входная цепь анализирующего фильтра отключается от входного сигнала и подключается к общей точке микросхемы на время $t \geq \tau_{CF}$ (τ_{CF} – постоянная времени фильтра).

Основные функции микроконтроллера PIC-18F452:

- формирование тактовой частоты 16 МГц для работы ПАИС;
- загрузка основной конфигурации (Primary Configurations) и динамической реконфигурации (Transition

Configurations) в ПАИС Anadigm через последовательный SPI-порт;

- преобразование аналогового сигнала в цифровую форму;
- реализация последовательного выходного порта USART для записи данных.

Экспериментальные данные

Для более точного сопоставления импульсных сигналов электромагнитного поля с вариациями магнитного поля Земли и началом сейсмических событий при анализе АЧХ и АВХ в работе приведены рисунки исследуемых процессов с различным временным разрешением.

На рис. 1, 2, 3, 4, 5, 6 представлены в различных временных масштабах синхронные записи АЧХ и АВХ импульсных компонент электромагнитного поля (И.К. Э-М. П.) ОНЧ-диапазона [613...3600 Гц, обс. ПГИ

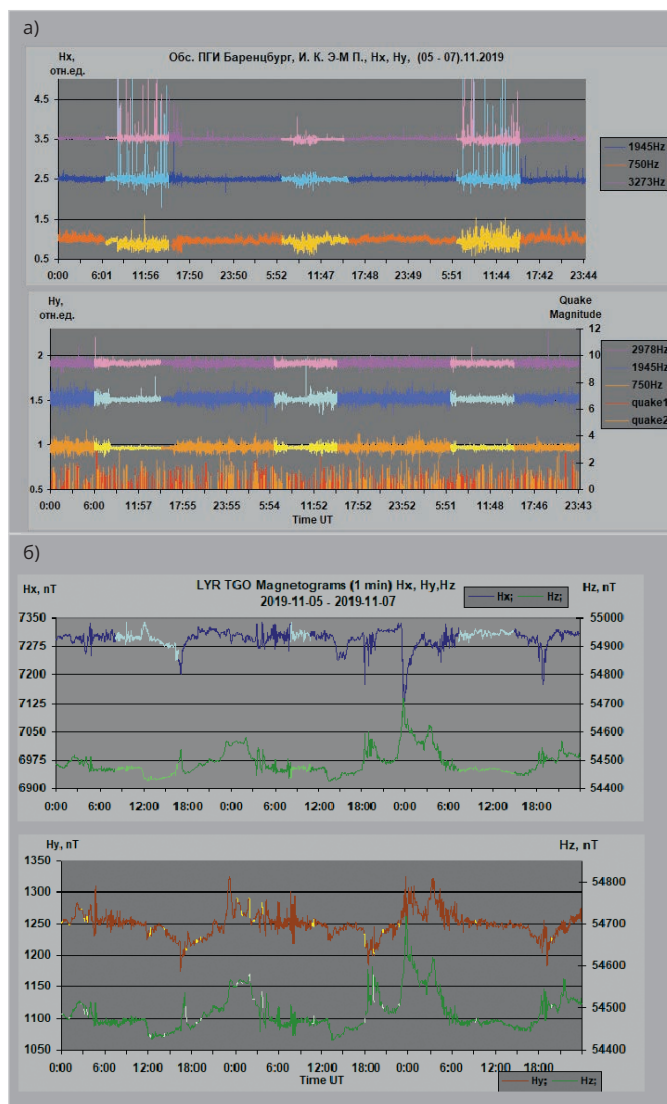


Рис. 3. Синхронная запись АЧХ И.К. Э-М. П., сейсмической активности и магнитного поля Земли, период записи [05.11.2019–07.11.2019]: а) АЧХ И.К. Э-М. П. [Hx, Hy] и сейсмическая активность (quake 1, quake 2); б) магнитограммы поля Земли [Hx, Hy, Hz]

Баренцбург; 78.08°, 14,2°], магнитограмм (1 мин) магнитного поля Земли (<https://space.fmi.fi/image/>), [обс. LYR TGO 78.20°, 15.82°] и календарь сейсмической активности (<https://www.norsar.no/extranet/>) района с географическими координатами (68±10°, 14±10°).

На рис. 1, 2 представлены два 10-суточных периода записи АЧХ И.К. Э-М. П. (Hx, Hy) и магнитного поля Земли (Hx, Hy, Hz): [01.11.2019–10.11.2019] и [01.11.2021–10.11.2021].

На рис. 3 представлен 3-суточный период записи АЧХ И.К. Э-М. П., сейсмической активности (quake 1, 2) и магнитного поля Земли: [05.11.2019–07.11.2019].

На рис. 4, 5 представлен суточный период записи АВХ И.К. Э-М. П. и сейсмической активности (quake 1, 2): [05.11.2019].

На рис. 6 приведены абсолютные значения импульсной компоненты электромагнитного поля.

Светлые оттенки участков приведённых графиков АЧХ И.К. Э-М. П. и компонент магнитного поля Земли отображают временные участки:

- когда область наблюдений И.К. Э-М. П. (D-слой нижней ионосферы Земли, h < 100 км) освещена Солнцем (рис. 1а, 2а, 3а);
- моменты наблюдений импульсных излучений э-м. поля (рис. 1б, 2б, 3б).

Календарь архивных сейсмических событий **quake 1, 2**, обозначенный различными цветовыми оттенками (рис. 3а, 4б, 4г), относится к районам, имеющим следующие географические координаты:

1. Quake 1 [(68...85)°, (10...20)°];
2. Quake 2 [(68...85)°, (05...25)°].

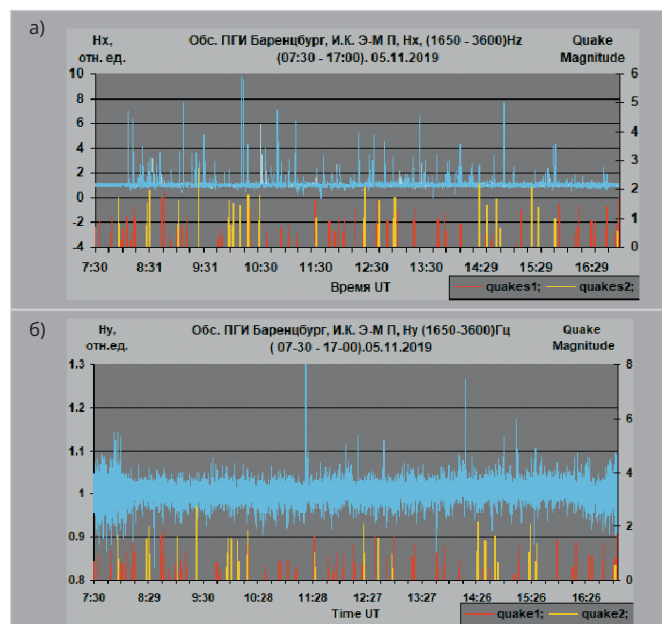


Рис. 5. Синхронная запись АВХ пьезоэлектромагнитного импульса П-Э-М.И. и сейсмической активности, период записи [(07:30–17:00) 05.11.2019]: а) синхронная запись АВХ П-Э-М.И. [Hx] и сейсмической активности (quakes 1, 2); б) синхронная запись АВХ П-Э-М.И. [Hy] и сейсмической активности (quakes 1, 2)

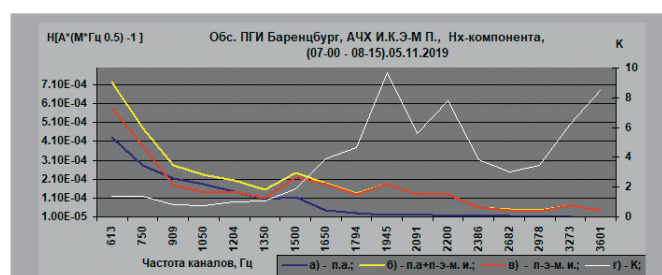


Рис. 6. АЧХ импульсной компоненты электромагнитного поля [Hx], ΔF = 613...3600 Гц, период записи [(07:00–08:15) 05.11.2019]: а) поле атмосфериков; б) суперпозиция поля атмосфериков и пьезоэлектромагнитного импульса; в) пьезоэлектромагнитный импульс; г) K = П-Э-М.М./П.А.

Первичный анализ экспериментальных данных И.К. Э-М. П. за указанные периоды времени позволяет сделать ряд предварительных выводов.

1. Условия регистраций импульсных излучений для компонент Hx и Hy различны.

Компонента Hx:

- нижняя ионосфера освещена Солнцем (рис. 1а, 2а, 3а);
- значения компонент магнитного поля Земли Hz < 54 475 nT и Hx < 7350 nT (рис. 1б, 2б, 3б).

Компонента Hy:

- значения компонент магнитного поля Земли Hz < 55 000 nT и Hy < 1400 nT (рис. 1б, 2б, 3б).
2. Амплитуда пьезоэлектромагнитного импульса значительно превышает амплитуду поля атмосфериков (в 2–9 раз), коэффициент отношений ампли-



Рис. 4. Синхронная запись АЧХ И.К. Э-М. П. и сейсмической активности, период записи 05.11.2019: а) АЧХ И.К. Э-М. П. [Hx]; б) синхронная запись АВХ И.К. Э-М. П. [Hx] и сейсмической активности (quakes 1, 2); в) синхронная запись АВХ И.К. Э-М. П. [Hy] и сейсмической активности (quakes 1, 2)

туд этих излучений носит частотно-зависимый характер (рис. 6г). Абсолютные значения импульсной компоненты электромагнитного поля для промежутка времени записи [(07:00–08:15) 05.11.2019] приведены на рис. 6, где: а) поле атмосфериков [07:00]; б) суперпозиция поля атмосфериков и пьезоэлектромагнитного импульса [08:15]; в) пьезоэлектромагнитный импульс.

Амплитуда пьезоэлектромагнитного импульса для каждой частоты анализатора спектра была определена по формуле:

$$П-Э-М. И. = \sqrt{(И.К. Э-М. П.)^2 - (П. А.)^2}$$

3. Диапазон волн пьезоэлектромагнитного импульса включает в себя диапазон как поверхностных, так и пространственных волн волновода земля-ионосфера.

4. Временные характеристики между сейсмическими событиями, зарегистрированными станциями норвежской сети Norsar [https://www.norsar.no/extranet/bulletins/], и пьезоэлектромагнитными импульсами можно оценить по АЧХ импульсной компоненты электромагнитного поля (рис. 4б, 4г, 5а, 5б).

Хочется надеяться, что приведённые экспериментальные данные И.К. Э-М. П. заинтересуют исследователей, изучающих физические процессы, протекающие в нижней ионосфере Земли, и сейсмологов.

Литература

1. Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. М.: Наука, 1985. С. 34.
2. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионо-

сфера. М.: Изд-во «Наука», 1972. С. 563.

3. Галахов А.А., Ахметов О.И. Комплекс аппаратуры для регистрации импульсной компоненты электромагнитного поля очень низкой частоты // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 136–142.
4. Галахов А.А., Ахметов О.И., Кириллов В.И. Регистрация ортогональных магнитных компонент импульсной составляющей электромагнитного поля ИНЧ/ОНЧ-диапазона на архипелаге Шпицберген // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 6. С. 69–73.
5. Галахов А.А., Ахметов О.И., Кириллов В.И. Аналоговый анализатор спектра атмосфериков КНЧ/ОНЧ-диапазонов на программируемых интегральных схемах // Приборы и

- техника эксперимента. 2015. № 1. С. 146–150.
6. *Галахов А., Косолапенко В., Ларченко А., Пильгаев С.* Анализатор спектра поля атмосфериков на реконструируемых ПАИС Anadigm // Современная электроника. 2019. № 7. С. 62–66.
 7. *Галахов А.А., Ахметов О.И., Кириллов В.И.* Особенности применения анализатора спектра атмосфериков в КНЧ/ОНЧ-диапазонах для мониторинга состояния волновода земля-ионосфера // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 109–113.
 8. *Галахов А.А., Ахметов О.И.* Поперечный резонанс в высокоширотной части волновода земля-ионосфера во время солнечного затмения 20.03.2015 // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57. № 5. С. 664–669.
 9. *Галахов А.* Анализатор спектра поля атмосфериков – инструмент изучения гелиогеофизической обстановки // Современная электроника. 2020. № 8. С. 30–34.
 10. *Галахов А.* Влияние вспышки на Солнце на АЧХ поля атмосфериков (экспериментальные данные) // Современная электроника. 2021. № 6. С. 64–65.
 11. *Галахов А., Галкин А.* Синхронная запись АЧХ поля атмосфериков на разнесённых по широте авральных обсерваториях (экспериментальные данные) // Современная электроника. 2023. № 2. С. 60–63.
 12. *Галахов А.* Поле атмосфериков на фоне сейсмической активности при различной геофизической обстановке (экспериментальные данные) // Современная электроника. 2024. № 5. С. 40–45.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Утверждён бюджет на разработку системы управления полётами дронов в едином воздушном пространстве

Росавиация согласовала финансирование первого этапа создания единой цифровой платформы для организации воздушного движения (ЕС ОрВД), которая будет учитывать как пилотируемые, так и беспилотные воздушные суда. На эти цели до конца 2027 года планируется выделить около 10,4 млрд рублей. Соответствующая информация содержится в письме руководителя Росавиации Дмитрия Ядрова, направленном в Минтранс, Минпромторг и вице-премьеру Виталию Савельеву 23 июня 2025 года. Копия документа имеется в распоряжении «Ведомостей», его подлинность подтвердил источник, близкий к авиационным регуляторам.

Основой ЕС ОрВД станет Единая интегрированная система планирования использования воздушного пространства (ЕИС ПИВП). Разработка системы предусмотрена федеральным проектом «Развитие инфраструктуры БАС» в рамках соответствующего нацпроекта. Однако в версии нацпроекта, имевшейся у «Ведомостей» на конец 2024 года, на создание системы было заложено лишь 4 млрд рублей до 2030 года, при этом финансирование должно было начаться только с 2027 года.

Техническое задание на первый этап – создание ЕИС ПИВП – было согласовано с ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», АО «Концерн ВКО „Алмаз-Антей“» и Росавиацией без замечаний. Реализация проекта запланирована в два этапа: первый продлится с 2025 по 2027 год, второй – с 2028 по 2030 год. Во II квартале 2025 года планировалось заключить контракт между Госкорпорацией по ОрВД и «Алмаз-Антей» как единственным исполнителем работ.



«В настоящий момент идут работы по заключению контракта. В ближайшее время он будет заключён», – сообщил «Ведомостям» заместитель генерального директора «Алмаз-Антей» Дмитрий Савицкий. Представитель Росавиации подтвердил, что ведомство и Госкорпорация по ОрВД продолжают работу над созданием ЕИС ПИВП, которая будет сопряжена с централизованной интегрированной базой данных ЕС ОрВД. По его словам, техническое задание уже согласовано, а до конца III квартала планируется подписать контракт с «Алмаз-Антей». Новая система позволит обеспечить бесконфликтное планирование полетов беспилотных и пилотируемых воздушных судов в едином воздушном пространстве, что повысит безопасность и расширит сферы применения беспилотников.

Представитель Минпромторга перенаправил запрос «Ведомостей» в Минтранс. Ведомство и Госкорпорация по ОрВД пока не предоставили комментариев.

Ранее, в мае 2025 года, «Ведомости» сообщили о создании в восьми регионах инфраструктуры для контроля за беспилотниками. По результатам проведённых закупок генподрядчиком во всех случаях выступил «Алмаз-Антей», а общая сумма контрактов

составила 642 млн рублей. Регионы закупали решения для системы автоматического наблюдения за воздушным пространством, чтобы сделать дроны видимыми для пилотов и диспетчеров.

Эксперты отмечают, что основная сложность создания ЕИС ПИВП заключается не в разработке IT-системы, а в интеграции разнородных баз данных, протоколов и регламентов использования воздушного пространства. Это требует обеспечения высокой надёжности, резервирования и информационной безопасности. По мнению специалистов, выделенное финансирование соответствует масштабу задачи, однако к 2027 году может потребоваться дополнительное бюджетное обеспечение в связи с растущими требованиями к беспилотной авиации.

Создание региональной инфраструктуры для контроля БПЛА является капиталоемким процессом, включающим не только закупку оборудования, но и строительство опорных сетей, каналов связи и центров обработки данных. В рамках бюджета ЕИС ПИВП эти работы могут занять до 30–40% средств на первом этапе. При масштабировании на все регионы страны расходы значительно возрастут.

