

ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ СПУТНИКИ

Краткий обзор технологии
аэродинамических привязных высотных платформ
систем телекоммуникаций, ДЗЗ, точной навигации.

ООО «Гиронавтика»

www.gyronautica.ru

12.2021

Оглавление

Проблема «цифрового разрыва»	2
Спутниковые системы связи	5
Атмосферные спутники	6
Аэростатические привязные платформы	8
Аэродинамические привязные платформы	9
Воздушное колесо	13
Гиропланер	15
Инерциальный вертикальный взлёт	19
Юридический вопрос	20
Высотная ветроэнергетика	21
Экология связи	25
Геостационарные атмосферные спутники	26
Транспортная сеть связи	29
Атмосферная оптическая магистральная сеть	32
Геостационарное атмосферное ДЗЗ	34
Сверхточная региональная навигация	35
Синергия сервисов	36
Источники	38

Проблема «цифрового разрыва»

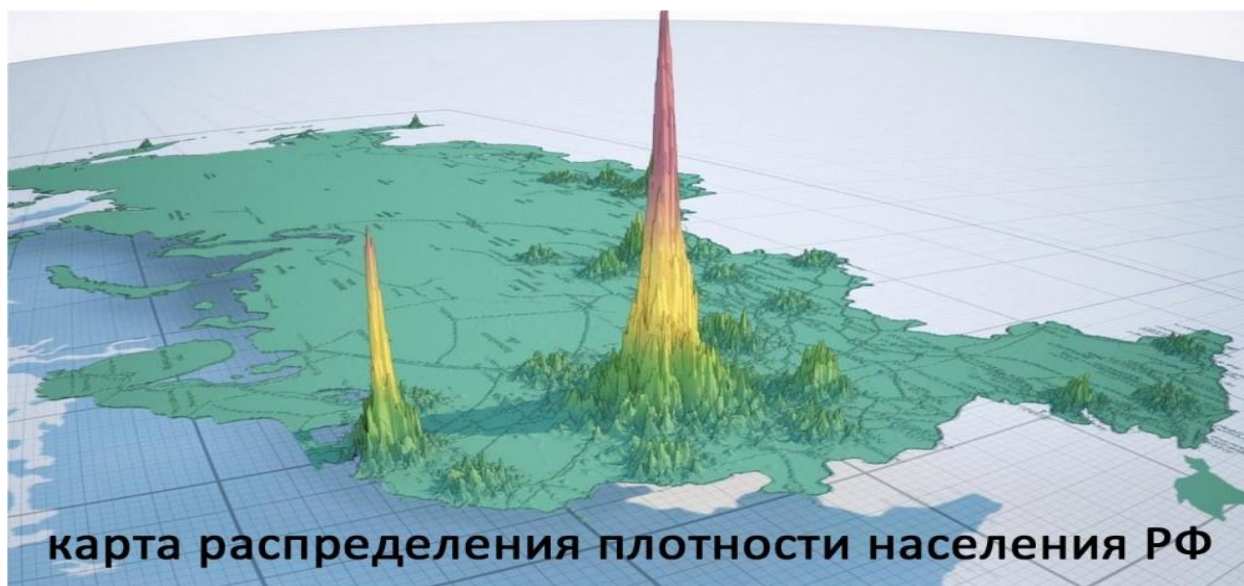
Современные технологии связи смогли дать доступ в интернет лишь половине человечества, менее 4 млрд жителей планеты на 10% её поверхности. Факторы, сдерживающие развитие и обостряющие цифровое неравенство:

- Нерентабельность технологий связи при низкой плотности абонентов,
- отсутствие магистральных каналов связи и источников энергии.

Существующие технологии не способна решить задачу полного покрытия территории России **мобильным широкополосным доступом (МШПД)**.

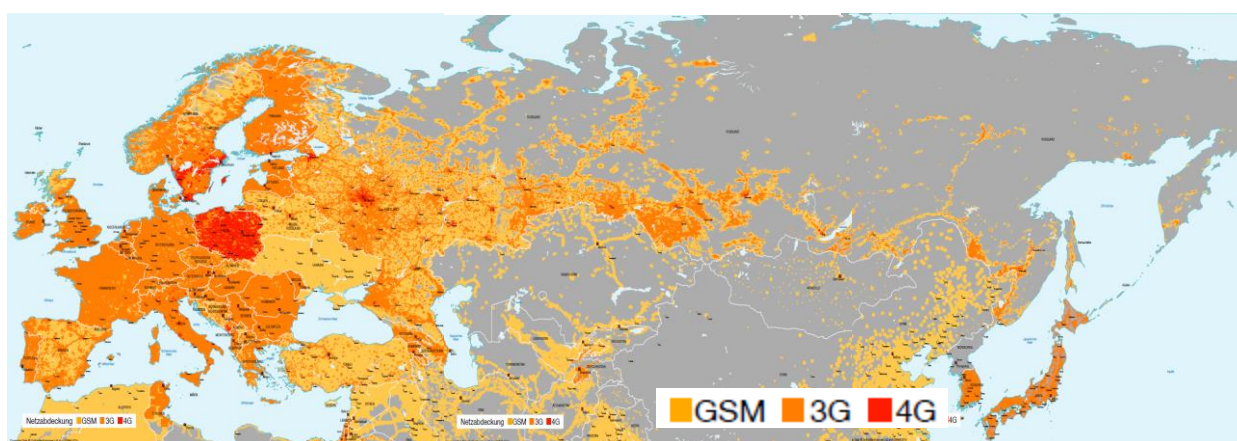
Все города России имеют полное покрытие сетями мобильной связи 3G, 4G, активно планируются сети 5G. За пределами городов покрытие поселений малоэтажной застройки сетями мобильной связи происходит со стационарных наземных телекоммуникационных вышек. С падением плотности абонентов растут размеры сот, растёт мощность передатчиков, увеличивается необходимая высота вышек связи, растут расстояния и стоимость прокладки кабельных линий связи и электроснабжения. Себестоимость связи резко растёт, платёжеспособный спрос снижается. Системы сотовой связи с телекоммуникационных вышек имеют пределы роста и рентабельности в зависимости от плотности населения и состояния инфраструктуры. Так возникает «цифровой разрыв», удача - если за пределами крупного населённого пункта удаётся совершить голосовой звонок, о мобильном интернете мечтать уже не приходится.

2/3 территории России имеют плотность населения мене 3 чел/км², вдали от линий связи и надёжного электроснабжения. 6725 населённых пунктов не могут быть подключены к Сети. Более того, в России есть населённые пункты, в которых отсутствует даже голосовая сотовая связь — это 1343 малых посёлков и деревень.



Всё население России по федеральным программам должно было получить возможность доступа к единой информационной сети. Изначально стоимость решения этой важнейшей задачи была оценена в 168 миллиардов рублей. Федеральный закон «О связи» 2003г. ставил целью обеспечение стационарной телефонной связью, его редакция 2014г. предусматривала прокладку волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) до «центров коллективного доступа» в часовой доступности для населённых пунктов с численностью от 250 до 500 жителей.

Без решения **проблемы последней мили** не могут быть устранены причины «цифрового разрыва» и обостряющегося «цифрового неравенства».



Без доступной надёжной связи большая часть территории России технологически исключена из полноценной хозяйственной деятельности, внутри страны существует и обостряется проблема цифрового неравенства регионов. В современной экономике, опирающейся на информационные технологии, данная проблема неизбежно влечёт тяжёлые социальные, экономические и макроэкономические последствия.

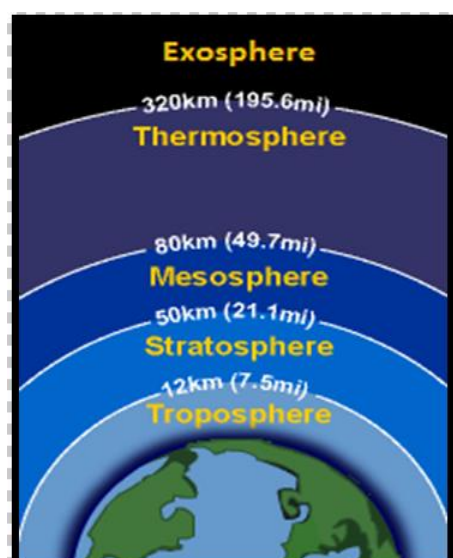
Для покрытия территории России мобильной широкополосной связью, освоения обширных территорий Арктики, Сибири и Дальнего Востока, необходимо экономически эффективно решить минимум три технически сложные проблемы:

- Поднять базовые станции мобильной сотовой связи;
- Построить транспортную сеть базовых станций;
- Дать надёжное энергоснабжение телекоммуникационной аппаратуре.

Проблему полного покрытия России, построения единого национального информационного пространства можно эффективно решить только с помощью **энергетически автономных высотных телекоммуникационных платформ**.

Высотные платформы (HAPs) можно классифицировать по принципу полёта на **аэростатические, аэродинамические и баллистические** (инерциальные). К последним относятся космические аппараты (КА), искусственные спутники Земли.

Формально, все перечисленные классы аппаратов летают внутри **атмосферы**, космические – в её верхней части, так называемом, ближнем космосе. Низкоорбитальные (LEO) КА летают по баллистическим траекториям в **термосфере**, начинающейся на высотах 80-90км. Средние орбиты (МЕО) и геостационарные (GEO, 35786км) находятся в **экзосфере**, заканчивающейся на высоте 190 000 км - половине расстояния до Луны.



Спутниковые системы связи

Космические аппараты (спутники вещания) позволили охватить большую часть территории России телевизионным вещанием, но их возможности в организации систем мобильной связи ограничены. КА, и геостационарные, и низкоорбитальные, дороги в производстве, в выведении и поддержании, при ограниченном времени активной работы, что обуславливает высокую себестоимость **спутниковых систем связи (ССС)**. Развитие космической связи возможно только с мощной государственной поддержкой, а основные источники коммерциализации находятся в области вещания. Коммерческие СССР имеют узкую нишу, им сложно конкурировать на рынке мобильной связи с другими технологиями, они не способны самостоятельно покрыть растущие объёмы фиксированного и тем более мобильного ШПД.

Ограничения на возможности СССР накладывают объективные физические факторы: слабый сигнал связи, высокая скорость пролёта низкоорбитальных КА, большая задержка распространения сигнала до геостационарных КА. Ограниченная энергетика КА обуславливает предел мощности нисходящего сигнала, а значит: большие габариты тарелок узконаправленных антенн, высокую стоимость конечного оборудования, неизбежную метеозависимость и ограничения скорости передачи данных. Проблемы СССР наиболее остро проявляются в высоких широтах, где нет других систем связи.

Не существует конкурентных спутниковых технологий мобильного ШПД. Есть небольшой, сокращающийся сегмент услуг подвижной спутниковой телефонии (снижение доли с 4% в 2000г., до 2.1% в 2013г.), данная технология широко применяется для телефонной связи на море, но она не предназначена и имеет ограниченные возможности для передачи данных.

Смещения спроса от телефонии к ШПД привела к превышению предложения СССР над спросом в Европе и Америке, к снижению темпов роста этого сегмента космической отрасли. **Следствием жёсткой конкуренции с операторами сотовой связи является факт, что все публичные игроки в этом сегменте, кроме Inmarsat, уже прошли стадии банкротства, имеют малую абонентскую базу, низкую доходность или убыточны.**

Фиксированная спутниковая связь (стационарная связь через громоздкую спутниковую антенну) позволяет получить доступ к сети на скорости до 40/10 Мбит/с (*по цене 5000 руб/мес*), может участвовать в построении сетей мобильного ШПД, но с привлечением и поддержкой других технологий на последней миле и в обратном канале.

Атмосферные спутники

"HAPS представляет новую технологию, которая может революционизировать индустрию беспроводной связи".

"Глобальная система связи, на стратосферных платформах может помочь удовлетворить мировой спрос на доступные высокоскоростные беспроводные коммуникации".

ITU, Международный союз электросвязи.

Платформы подъёма телекоммуникационной аппаратуры в стратосфере принято называть по аналогии с космическими – **атмосферными спутниками**, они возможны на базе летательных аппаратов разных видов по параметрам:

- | | | |
|--------------------|---|--------------------|
| • пилотируемые | / | беспилотные (БЛА), |
| • аэростатические | / | аэродинамические, |
| • свободнолетающие | / | управляемые, |
| • автономные | / | привязные, |
| • моторные | / | безмоторные. |



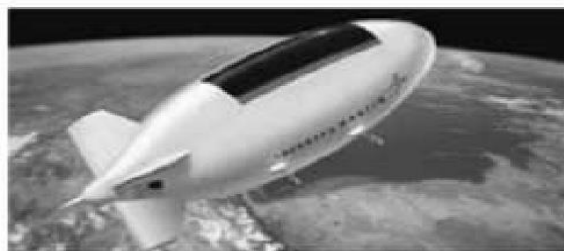
Manned Planes
—e.g. Grob G520T Egrett
(a)



Unmanned Hydrogen Powered Planes
— e.g. Global Observer
(b)



Unmanned Solar Powered Planes
—e.g. NASA/AV Pathfinder Plus
(c)



Unmanned Solar Powered Airships
—e.g. Lockheed Martin HAA
(d)

Типы и примеры летающих высотных телекоммуникационных платформ:

- | | |
|------------------------------------|---|
| а) пилотируемые высотные самолёты; | б) беспилотные самолёты на жидком водороде; |
| с) БЛА на солнечных батареях; | д) дирижабли на солнечных батареях. |

Высокая стоимость лётного часа пилотируемой авиации приемлема, только для временного (военного) применения таких телекоммуникационных платформ. Время полёта аэростатических аппаратов лимитировано утечкой несущего газа, 1кг гелия стоит дороже \$1000. Типичная продолжительность полёта между дозаправками гелием составляет от нескольких дней до одного месяца.

Солнечная энергия — доступный источник для полёта и аппаратуры днём, но есть проблемы ночью и высоких широтах. Мощные аккумуляторы способны поднять только **тяжёлые беспилотные летательные аппараты** с размахом крыла авиалайнера или гигантские дирижабли. Основная доля энергии батарей, идёт на удержание летательного аппарата в воздухе, на борьбу с высотным ветром.

Стоимость подъёма атмосферного спутника ниже стоимости выведения КА, возможен спуск, обслуживание и ремонт дорогой телекоммуникационной аппаратуры. Локальная связь значительно дешевле, но количество необходимое для покрытия обширных территорий, многократно растёт, в итоге стоимость системы связи на таких платформах приближается к космической.



Helios (NASA). [www.solaraircraft.com]



Loon Project (Google).

Актуальны направления радикального снижения стоимости высотной платформы. Компания Google вела проект «Loon», раздающий интернет с лёгких ретрансляторов массой до 100кг **на свободнолетающих баллонах**. В данной технологии невозможна локализация по месту, для обеспечения связи надо покрыть всё небо планеты неуправляемыми шарами, необходимо одновременно держать в воздухе 400 000 аппаратов. Если среднее время свободного полёта для каждого баллона довести до 100 дней, то, чтобы поддерживать необходимую численность, необходимо ежедневно запускать 4 000 шаров с ретрансляторами, по 1 каждые 20 секунд!

Проект имел проблемы с рентабельностью, при больших текущих затратах по непрерывному производству и запуску фактически одноразовых ретрансляторов, поддержания наземной инфраструктуры, без гарантии на надёжность связи по месту и времени. Национальный суверенитет воздушного пространства всего нескольких стран исключает применение технологии в северном полушарии. В январе 2021 года Alphabet закрыла проект Loon.

Привязные платформы

Привязные летательные аппараты способны к длительному полёту, проще автономных летающих аппаратов, леер/стропа/кабель удерживает платформы в полёте. Они не несут источник энергии и аккумуляторы, а получают энергию по кабелю от наземной станции или из ветрового потока. Отказ от подъёма тяжёлых источников энергии и аккумуляторов сокращает вес, габариты и стоимость высотной платформы. Законы многих стран либеральны к привязным аппаратам. Высотные привязные платформы, способные достать слоёв нижней стратосферы, фактически являются **геостационарными атмосферными спутниками ГАС**.

Аэростатические привязные платформы

Аэростатические привязные платформы легче воздуха поднимаются силой Архимеда. Высота ограничена весом кабеля, составляет до 4000м для крупных привязных аэростатов. Наземная станция передаёт по кабелю большую мощность для питания полезной нагрузки (до 40кВт) представляет сложное стационарное инженерное сооружение с электростанцией, причальной мачтой, мощной лебёдкой для спуска/подъёма, газгольдерной станцией дозаправки гелием. Такая станция не способна к автономной работе, требует обслуживающего персонала.



Непрерывная связь на аэростатических платформах невозможна по ряду причин. Максимальная длительность полёта до 30 суток, ограничена временем утечки гелия. Ограничения на непрерывность накладывают сильный высотный ветер и опасность атмосферного разряда. Молния способна повредить аэростат, токопроводящий кабель, уничтожить наземную станцию.

Аэродинамические привязные платформы

Аэродинамические привязные платформы — привязные летательные аппараты тяжелее воздуха, удерживаются в полёте аэродинамической подъёмной силой ветра или тягой, создаваемой винтами. Соответственно, есть два вида: **безмоторные** и **моторные** платформы.

Современный вид **моторных привязных аэродинамических платформ** сейчас массово представлен в варианте привязных электрических мультикоптеров. Длительность их полёта не ограничена ёмкостью тяжёлых батарей, аппараты получают энергию по кабелю от наземной базы. В сравнении с аэростатическими платформами привязные мультикоптеры значительно компактнее, быстрее в развёртывании, не требуют трудоёмкой дозаправки дорогим гелием, не имеют данного ограничения по времени полёта. Наземная инфраструктура компактнее, меньше необходимая численность персонала.



Для полёта с полезной нагрузкой как у аэростата, мультикоптеру требуется многократно **большая** мощность и, соответственно, более тяжёлый кабель питания, который ограничивает высоту подъёма, 50...100м для малых мультикоптеров, и до 200...300м для **тяжёлых моделей электровертолётов** с высоковольтной системой электропитания. Усиление ветра требует увеличения потребной мощности для полёта и стабилизации, накладывает погодные ограничения использования моторных привязных аэродинамических платформ.

Итак, космические и аэростатические технологии чрезвычайно дороги, экономически неконкурентны для коммерческого применения.

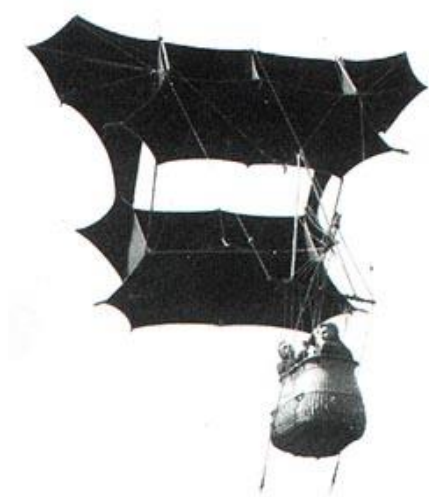
Гигантские самолёты на солнечных батареях не способны работать в выше тропических широт, не могут развернуть панели к низкому Солнцу даже летом.

Привязные моторные аэродинамические платформы (мультикоптеры и электровертолёты) имеют очень малую высоту подъёма до 300м, боятся ветра, молний, энергетически затратны, не эффективны, не автономны.

С высотным ветром бесполезно бороться, его нужно уметь использовать. Только безмоторные **ПРИВЯЗНЫЕ** аэродинамические летательные аппараты способны обеспечить большую высоту подъёма телекоммуникационной платформы и энергетическую автономность системы связи.

*Исторически первые, самые древние летательные аппараты, поднятые человеком и первые аппараты, поднявшие человека в небо – **воздушные змеи**. *Абсолютный мировой рекорд высоты подъёма воздушных змеев установлен сотрудниками германской метеостанции Lindenberg, в 1919 году. Связка из 8 змеев на стальном леере была поднята на высоту 9740м.*

Чтобы высоко поднимать полезную нагрузку необходимо поднимать **аэродинамическое качество K** , отношение подъёмной силы к сопротивлению, для змея - тангенс угла возвышения. Мягкое крыло змея и несущий ротор автожира, имеют невысокое качество ($K = 6 \dots 10$) при жёстких прочностных ограничениях силы ветрового напора. Максимально высоким качеством $K > 30$ (в узком диапазоне скоростей) может обладать ЛА с жёстким крылом большого удлинения.



Специалистами Центральной научно-исследовательской лаборатории "АСТРА МАИ" был представлен проект «АИСТ» (аэродинамическая интегральная система телекоммуникаций [9]). Привязная аэродинамическая платформа – воздушный змей, планер-биплан с жёстким замкнутым композитным крылом большого удлинения с размахом 28м, массой 800кг для подъёма 250кг телекоммуникационной аппаратуры и 280кг троса на высоту от 4км до 10км.

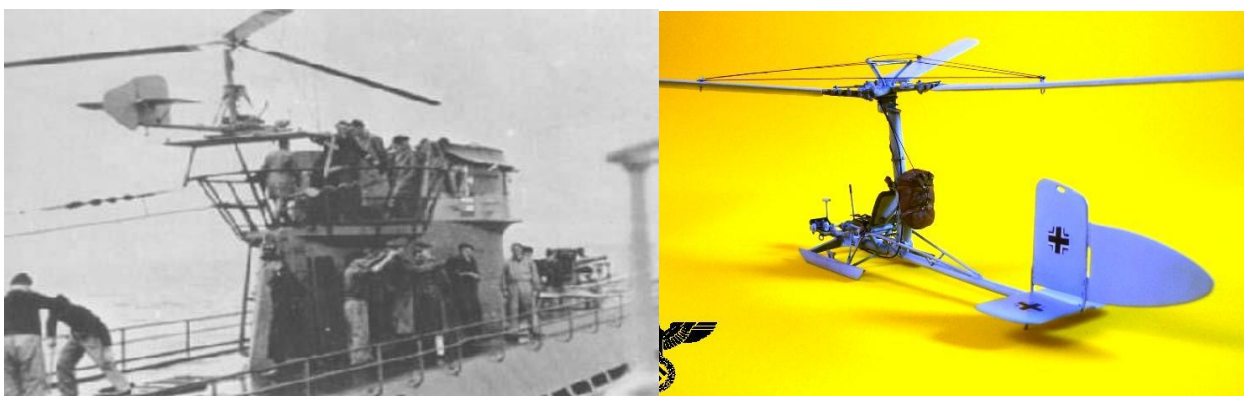
Неизбежные рывки тяги змея приводят к избыточному увеличению массы аппарата, толщины и парусности леера. Привязной планер мог бы держаться на расчётной высоте в скоростном ветровом потоке с большим углом возвышения, но номинально высокое аэродинамическое качество ($K \sim 30$) планера аппарата неизбежно портит не столько леер, как осевая турбина ветрогенератора, создающая большое аэродинамическое сопротивление. В итоге $K < 15$.

Высокая нагрузка на площадь крыла, более 10 кг/м², ограничивает минимальную скорость ветра: 16 м/с у земли и 32 м/с на высоте 10 км. Крыло большого удлинения имеет узкий скоростной диапазон, опасно теряет **устойчивость и управляемость** при слабом ветре в разряженных слоях атмосферы. Пределы прочности ограничивают верхнюю границу скорости ветра. В высотных струйных течениях была зафиксирована скорость ветра **400 км/ч**. [10]

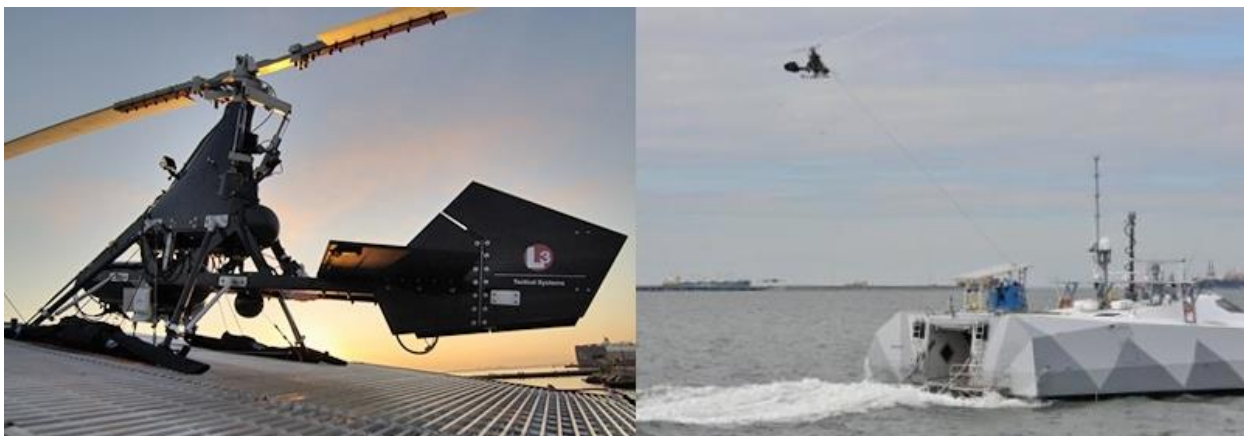
Ахиллесова пята проекта - проблема запуска. Для подъема на расчетную высоту с достаточным ветром, требуется длительный разгон на буксире автомобилем или катером, по прямой против ветра, без помех воздушных линий электропередач. По предварительным расчетам подъем займет более 1.5 часов.

Недостатки змеев: проблемы с запуском и при посадке, проблемы с устойчивостью на малых скоростях и в турбулентном потоке, привели к появлению нового типа привязных ЛА - **буксируемых автожиров**, роторпланеров (*rotorkites*).

Складной легкий привязной пилотируемый автожир Fa.330 "Bachstelze" на 300-метровом тросе поднимал пилота-наблюдателя на высоту 220 м, обеспечивал взлет и безопасное возвращение. Аппарат демонстрировал очень высокую, до 60% весовую отдачу, при массе 75кг имел 175кг взлетной массы!



С 2014 года компания L3 Communications испытывает беспилотный буксируемый автожир «Valkyrie» взлетным весом 95кг для флота США.



Буксируемые автожиры обладают малым аэродинамическим качеством $K=5$ и малым углом возвышения. Тяжёлый силовой кабель питания ограничивает высоту и угол подъёма, минимальную скорость буксировки. Аппарат не способен достать ветер достаточный для полёта в режиме змея.

Известные привязные аэродинамические летательные аппараты - **воздушные змеи и привязные автожиры** используют ветер для полёта, каждая имеет свои преимущества и нерешённые проблемы: запуска, прочности, энергоснабжения полезной нагрузки, имеют узкий диапазон скоростей, не способны летать на больших высотах с большим углом возвышения.

Фиксированное крыло большого удлинения теряет прочность, обладает высоким аэродинамическим качеством в узком диапазоне скоростей, на малых скоростях теряет управляемость, а затем и устойчивость, валится в штопор. Диапазон скоростей потока чрезвычайно широк, от приземного штиля, до более 100м/с в струйных течениях верхней тропосферы.

Несущие винты имеют более широкий диапазон скоростей и углов атаки, устойчиво парашютируют, дают вертикальный взлёт и вертикальную посадку. Несущий винт – дорогая и сложная шарнирная конструкция, имеет ограниченную прочность и низкое аэродинамическое качество. Вертолётные жёсткие лопасти, имеют фиксированную крутку для одного режима, не способны работать в принципиально разных режимах по направлению потока через роторы.

- **Вертолётный режим** необходим для подъёма к достаточному ветру и мягкой посадки в приземном слабом ветровом потоке. Поток сверху-вниз.
- **Авторотация с высоким аэродинамическим качеством** необходима для подъёма и удержания на высоте с большим углом возвышения.

Скольжение в потоке с малым положительным углом атаки роторов.

- **Режим ветроколеса** даёт энергетическую автономность и большую высоту подъёма на тонком лёгком леере. Поток через роторы снизу-вверх.

Один ротор в вертолётном режиме и в режиме генерации порождает некомпенсированный реактивный момент, ветроэнергетической платформе необходима двухроторная или четырёхроторная схема. Подвижное шарнирное крепление лопастей несущих винтов порождает вибрацию, разрушающую раму платформы. Невозможны крупные многороторные схемы на традиционных несущих винтах. Большие несущие винты изменяемого шага имеют прочностные ограничения скорости потока, обладают низким аэродинамическим качеством.

Системные проблемы традиционных технологий привели к необходимости создания новых решений для высотных аэродинамических привязных платформ.

Воздушное колесо

Создана новая технология, энергетически автономных аэродинамических высотных привязных платформ, сочетающая вертикальный взлёт и высокое аэродинамическое качество в потоке. В основе новой технологии лежит инновационный несущий ротор «Воздушное колесо» (патент RU2538737).

Воздушное колесо (ВК) – несущий ротор летательных аппаратов вертикального взлёта и вертикальной посадки, гибрид несущего винта и замкнутого крыла большого удлинения.

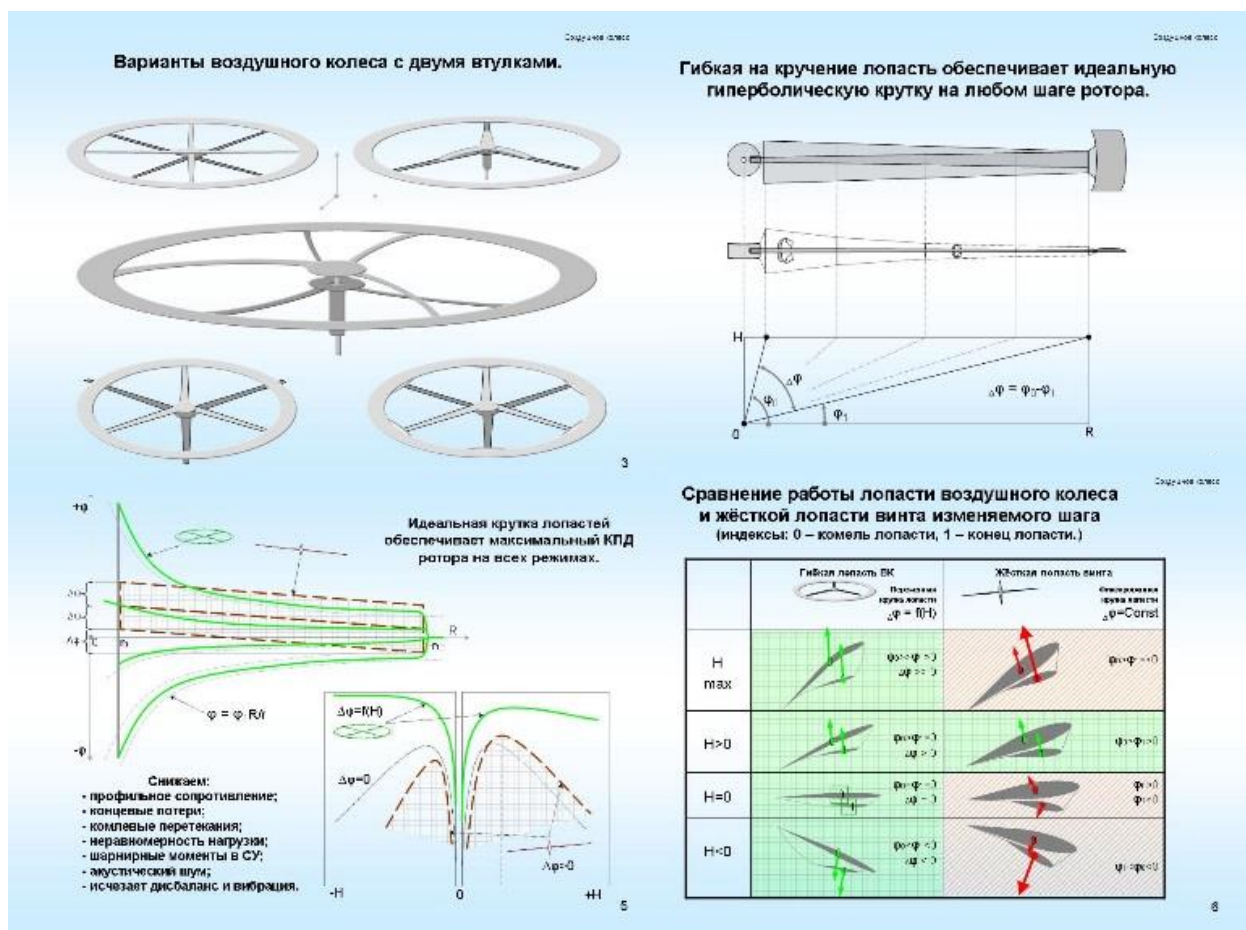


ВК может иметь одну или две разнесённые втулки. Облегчённые втулки избавлены от выламывающих циклических нагрузок и шарниров. Ротор с двумя втулками аналогичен велосипедному колесу приобретает жёсткость относительно оси вращения, летательный аппарат становится гиростабилизированным.

Лопастей ВК принципиально отличаются от тяжёлых жёстких вертолётных лопастей, они **адаптивные**, упругогибкие на кручение, натянуты между ободом и втулкой, имеют эффективный аэродинамический профиль. Переменная упругость на кручение вдоль лопасти обеспечивает идеальную гиперболическую крутку лопасти и равномерную нагрузку на диск ротора, при любом шаге, в широком рабочем диапазоне. Принципиальное отличие и уникальное качество ротора ВК — работа с высоким КПД в 3 разных режимах: **в вертолётном, на авторотации и в режиме ветроколеса**. ВК имеет более высокий КПД при висении в вертолётном режиме, в два раза более высокое аэродинамическое качество на авторотации и высокий коэффициент использования энергии потока в режиме ветроколеса.

Радикально снижается шум и аэродинамические потери. Минимальные массы и нагрузки в креплении лопасти с втулкой, а также в системе управления снижают потери, продлевают ресурс ответственного узла.

Воздушное колесо жёсткое в плане, сохраняет баланс, устраняется причина вибрации – родовое проклятие винтокрылых летательных аппаратов.



Воздушное колесо имеет внешнее замкнутое крыло - кольцеобразное или произвольной осесимметричной формы, которое выполняет несколько функций:

1. Тонкое монолитное **крыло** большого удлинения, натянутое центробежными силами, основной несущий элемент в скоростном ветровом потоке с минимальным индуктивным и профильным сопротивлением, с высоким **аэродинамическим качеством** ($K \sim 20-25$).
2. Кольцеобразный **маховик** с максимальным моментом инерции, запасает большой объём энергии, способен выдавать высокую мощность на взлёте непосредственно лопастям, без преобразований, без редуктора, без потерь, без реактивного момента.
3. **Силовой гироскоп**, прочно стабилизирующий летательный аппарат по крену и тангажу в турбулентном ветровом потоке, без сложных систем управления. Силовая гироскопическая стабилизация платформы делает её всепогодной, облегчает подвес полезной нагрузки: направленных антенн телекоммуникационной аппаратуры и камер наблюдения.
4. Внешнее кольцо – может быть **ротором прямого электрического привода и генератора** без потерь в механических редукторах.

5. Внешнее замкнутое крыло – конструктивный элемент структурной прочности ротора:

- увеличивает максимальную допустимую скорость ветрового напора;
- даёт тонким лопастям натяжение и внешнюю опору, обеспечивает идеальную соконусность ротора, убирает нечётные гармоники колебаний, устраняет флаттер концов лопастей;
- позволяет увеличить диаметр ротора при минимальном весе, снижает удельную нагрузку на площадь и необходимую скорость ветра для взлёта, посадки и висения;
- разгружает, облегчает и упрощает втулку ротора, избавляет лопасти от вертикальных и горизонтальных шарниров;
- устраняет дисбаланс и вибрацию, допускает многороторные схемы.

Несущий ротор автожира – винт переменного циклического шага с жёсткими лопастями фиксированного общего шага, работает в одном режиме – авторотация. Это сложный аэродинамический процесс с нулевым балансом энергии, потеря оборотов недопустима, съём энергии с ротора автожира невозможен.

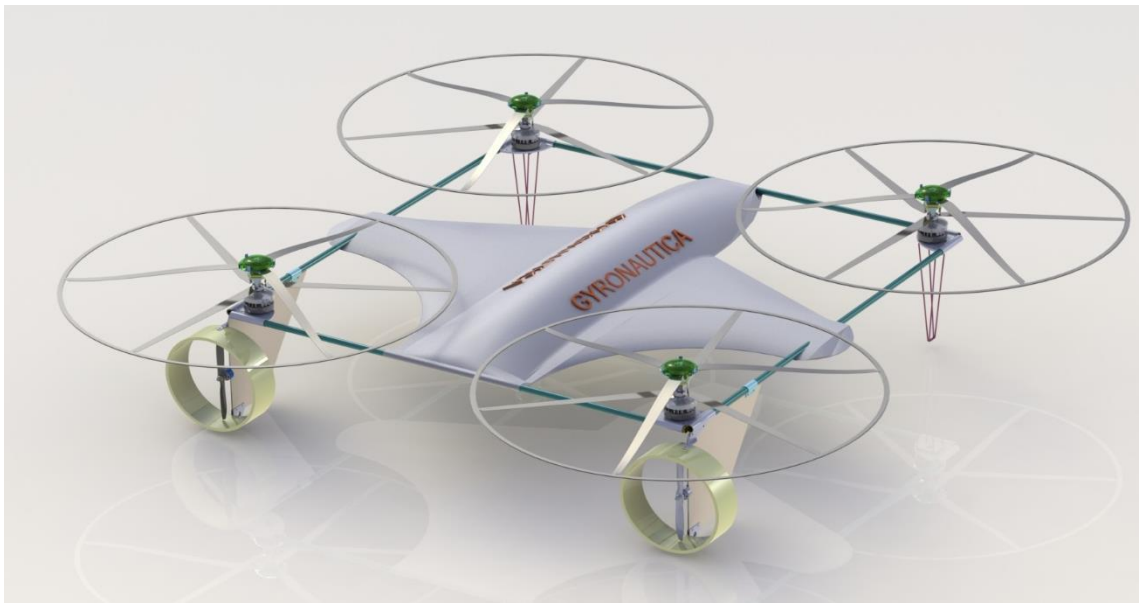
Воздушное колесо - ротор изменяемого шага с кинетическим накопителем энергии, работает в широком диапазоне на разных режимах с максимальным КПД, решает проблемы с запуском, устойчивостью в полёте, высотой подъёма, энергоснабжением полезной нагрузки.

Высокая структурная прочность воздушного колеса позволяет выдерживать мощный высотный ветер при минимальной массе.

Гиропланер

На роторах воздушное колесо возможен эффективный привязной аэродинамический гиросtabilизированный летательный аппарат вертикального взлёта и вертикальной посадки — **гиропланер** (гирозмей, gyroglider, gyrokite). Гиропланер – аналогичен привязным автожирам (rotorkite), вместо управления циклическом шагом большого несущего винта имеет несколько прочных несущих воздушных колёс с управляемым общим шагом, как воздушный змей имеет несущий корпус, летающее крыло, как мультикоптер имеет вертикальный взлёт.

Конструктивно гиропланер может быть реализован по двухроторной или многороторной схеме, реактивные моменты роторов противоположного вращения в вертолётном режиме и режиме ветротурбины взаимно компенсируются.



Четырёхроторный гиросамолёт - гибрид воздушного змея с квадрокоптером.

Гиросамолёт устойчиво вертикально взлетает независимо от погодных условий. Воздушные колеса большого диаметра требуют меньшей мощности, чем малые винты мультикоптеров. Гиросамолёт летает с положительным углом атаки, использует помощь ветра (а не борется с ним), что позволяет взлетать с лёгким отключаемым кабелем электропитания (до 300м), и/или на аккумуляторах, и/или совершать **инерциальный вертикальный подскок** на высоту более 500м, до ветра достаточного для дальнейшего набора высоты, уже полностью за счёт энергии потока. С увеличением высоты растёт сила и стабильность ветра, выше 300м исчезает турбулентность, вызванная влиянием поверхности.

Платформа всепогодная на всех режимах: при запуске, в полёте, при посадке. Силовая гироскопическая и аэродинамическая стабилизация надёжно удерживают гиросамолёт в потоке без участия системы управления. Продольное и поперечное смещение в пространстве, фиксация точки висения происходит с минимальными кренами, смещением аэродинамического фокуса, изменением общего шага отдельных колёс многороторной платформы. Высокая стабильность гиросамолёта, минимизирует запас прочности леера, вес, толщину и парусность, что в сочетании с высоким аэродинамическим качеством ($K > 15$) обеспечивает полёт с большим углом возвышения, минимальным ветровым сносом.

Высокая прочность воздушного колеса и способность к авторотации на малых углах атаки поднимает верхнее ограничение по скорости допустимого ветра и, соответственно, допустимую высоту полёта. Гиросамолёту при нагрузке на несущую площадь $3...5 \text{ кг/м}^2$, для полёта на привязи на малой высоте (до 1000м) достаточен ветер $9...12 \text{ м/с}$, на высотах 10-14 км потребуется $17...20 \text{ м/с}$. Учитываем, что в высотных струйных течениях возможен ветер более 100 м/с .



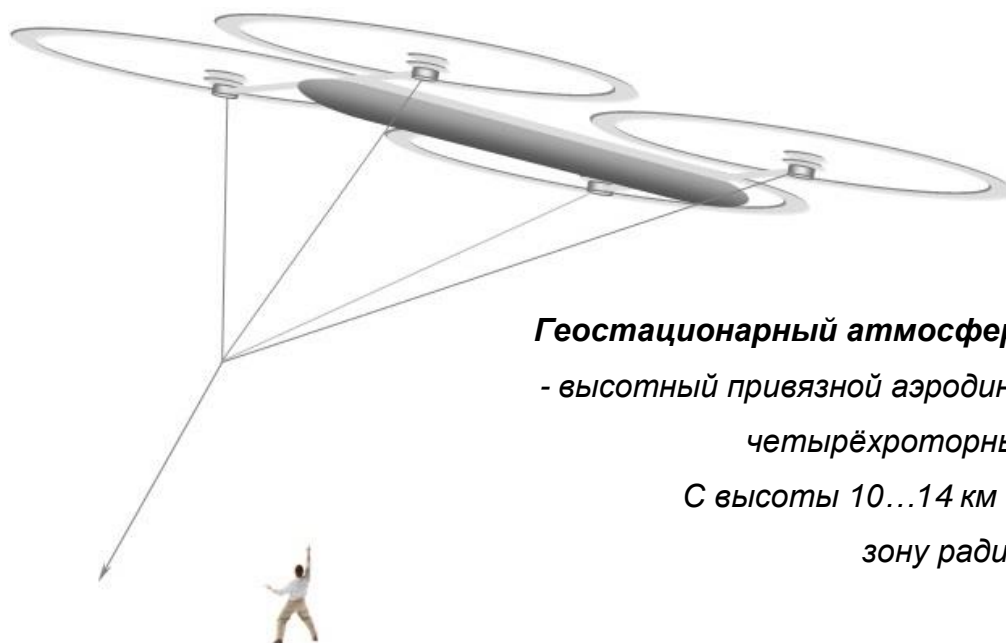
Высотный (стратосферный) гиропланер — **геостационарный атмосферный спутник (ГАС, GAS - geostationary atmospheric satellite)** - энергетически автономная высотная привязная аэродинамическая платформа. Стабильный высотный ветер тропопавзы - надёжный неисчерпаемый источник экологически чистой энергии высокой плотности в диапазоне $2...10 \text{ кВт/м}^2$. Плотность энергии высотного ветра на порядок выше солнечной и приземной ветровой энергии, при главном качестве – **непрерывности**. Энергии высотного ветрового потока достаточно для полёта тяжёлого ЛА и питания мощной полезной нагрузки. ГАС не нуждается в тяжёлых аккумуляторах, имеет высокую весовую отдачу, доля полезной нагрузки может составить до 30%...40% массы аппарата. Телекоммуникационной аппаратуре на высотных платформах не грозит перегрев, на высоте от 10 км надёжное естественное охлаждение ветром со стабильной температурой ниже -50°C , без влаги и пыли.

Минимальная наземная база – закреплённая на земле лебёдка натяжения леера. При спуске потенциальная энергия платформы утилизируется воздушными колёсами, запасается в маховиках. Мягкая посадка проходит в вертолётном режиме с натяжением леера лебёдкой наземной базы.

Леер - тонкая нить из материала с высокой удельной прочностью на разрыв, сверхвысокомолекулярный полиэтилен СВМПЭ / UHMWPE (Spectra®, Dyneema®,...) имеет предел высоты подъёма 378км (стекловолокно до 133км). Леер длиной 15км с 20-кратным запасом прочности составит до 15% массы аппарата. Нить СВМПЭ – не очень дорогой расходный материал, обрыв влечёт управляемый спуск и мягкую посадку ГАС на площадку обслуживания с заданными координатами.

Диэлектрический подвес с гидрофобным покрытием не подвержен обмерзанию и атмосферным разрядам. Леер узлового ГАС содержит оптоволокно – защищённый, надёжный, ёмкий канал обмена интернет-трафиком.

Воздушные колёса, в отличие от винтов фиксированного шага мультикоптеров, допускают широкий диапазон масштабирования по размерам. Вес полезной нагрузки привязных платформ возможен от граммов, до тонн.



Геостационарный атмосферный спутник
- высотный привязной аэродинамический ЛА,
четырёхроторный гиропланер.
С высоты 10...14 км контролирует
зону радиусом до 400км.

На длинный леер крупной высотной платформы ГАС могут крепиться миниатюрные лёгкие модули с сигнальными огнями, метеодатчиками, камерами наблюдения. Последовательное соединение на одном леере вертикальных гирлянд, где верхний высотный модуль удерживает несколько нижних платформ, работающих на малых высотах, может иметь большую суммарную массу.

Энергетически автономная привязная платформа требует минимальных капитальных и эксплуатационных затрат из всех вариантов аэродинамических и аэростатических аппаратов. **Себестоимость лётного времени ГАС на порядки ниже показателя других ЛА с аналогичным весом полезной нагрузки.** Длительность полёта ГАС не лимитирована, он способен годами автономно работать в ветровом потоке на высотах от 8 до 14 км с большим углом возвышения.

Преимущества геостационарных атмосферных спутников – длительность полёта, энергетическая автономность и энерговооружённость. Свобода от энергетики наземной базы, позволяет оперативно разворачивать дополнительные мощности систем мобильной связи с минимальными затратами при отсутствии инфраструктуры, в неосвоенных энергодефицитных районах, в местах массового скопления людей, при ЧС, спасательных и войсковых операциях, ...

Инерциальный вертикальный взлёт

Взлёт - наиболее сложный и энергозатратный режим для всех летательных аппаратов. Запуск змея сложный процесс, требующий сноровки, открытого места и подходящих погодных условий, запуск тяжёлого змея - многократно более сложная задача. Вертикальный взлёт здесь наиболее уместен, но требует больших энергетических затрат. Лучше вертикального взлёта может быть только всепогодный, быстрый, бесшумный, инерциальный вертикальный подъём (IVTOL). Именно такой взлёт обеспечивают роторы воздушное колесо.

Перед взлётом энергия закачивается в маховики, воздушные колёса разгоняются до высоких оборотов на земле, энергия поступает по кабелю от внешнего источника. Основная масса воздушного колеса сосредоточена в замкнутом крыле, момент инерции выше, чем у винтов в 15...20 раз. Массивный кольцообразный маховик накапливает большой объём энергии и затем выдаёт её непосредственно лопастям с мощностью, превышающей мощность двигателей раскрутки. Воздушное колесо является кинетическим накопителем энергии, без потерь преобразования механической энергии в другие виды, с неограниченным ресурсом по количеству циклов заряда-разряда.

Стартовая раскрутка роторов может производиться до больших линейных скоростей $u_0=280-300\text{ м/с}$ при минимальных полётных $u_1=50\text{ м/с}$. При инерциальном взлёте кинетическая энергия роторов переходит потенциальную энергию платформы со средним КПД $\eta \sim 0.3...0.5$. Маховики Воздушных колёс с относительной массой $m/M \sim 1/3$ от взлётной массы платформы запасают энергию для вертикального инерциального подъёма на высоту H , без учёта помощи ветра:

$$H = \eta (u_0^2 - u_1^2) m / 2 M g = 300...500 \text{ метров.}$$

Дальнейший подъём гиропланера до расчётной рабочей высоты происходит за счёт энергии ветрового потока (как правило, на скорости ветра $v > 5\text{ м/с}$).

Гиропланер не просто воздушный змей с инерциальным вертикальным взлётом, а управляемый привязной аэродинамический летательный аппарат с высоким аэродинамическим качеством ($K = 15...20$), способный осуществлять наиболее энергетически эффективный способ набора высоты – «подъём по серпантину», широкими галсами поперёк ветра. Таким способом увеличивается площадь сбора энергии ветрового потока (скорости v), многократно возрастает вымпельная скорость V аппарата относительно воздуха, умножается на аэродинамическое качество K гиропланера, до $V = Kv$, подъёмная сила растёт в квадрате от воздушной скорости $Y \sim (Kv)^2$.

Юридическое право

Основополагающие документы, регламентирующие использование воздушного пространства в России (Воздушный кодекс РФ (ВК) и Правила использования воздушного пространства (ПиВП)) регулируют условия подъёма привязных аэростатов, при этом никак **не ограничивают использование привязных аэродинамических летательных аппаратов - воздушных змеев**. Ни по массе, ни по высоте, ни по времени, ни по месту подъёма.

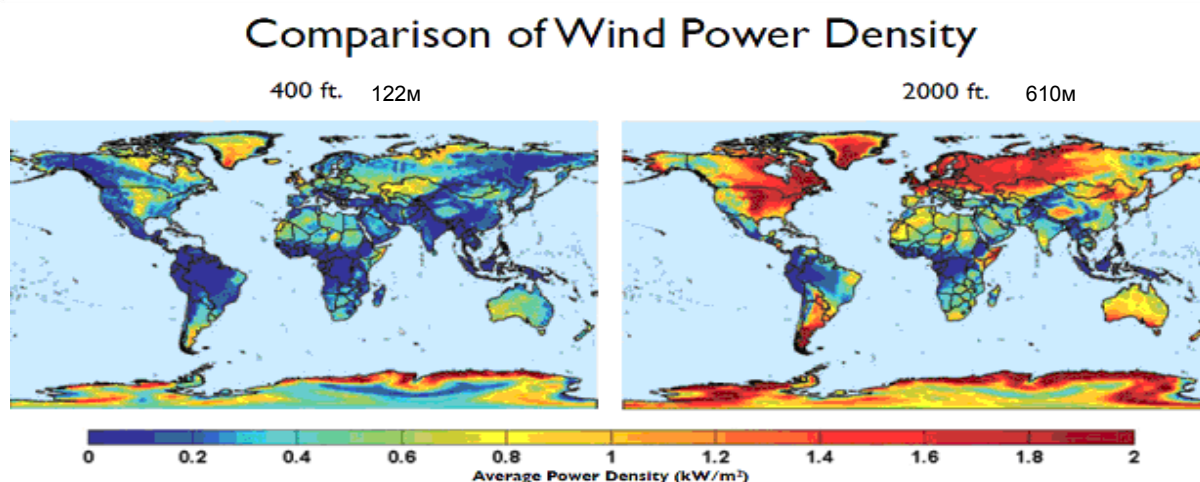
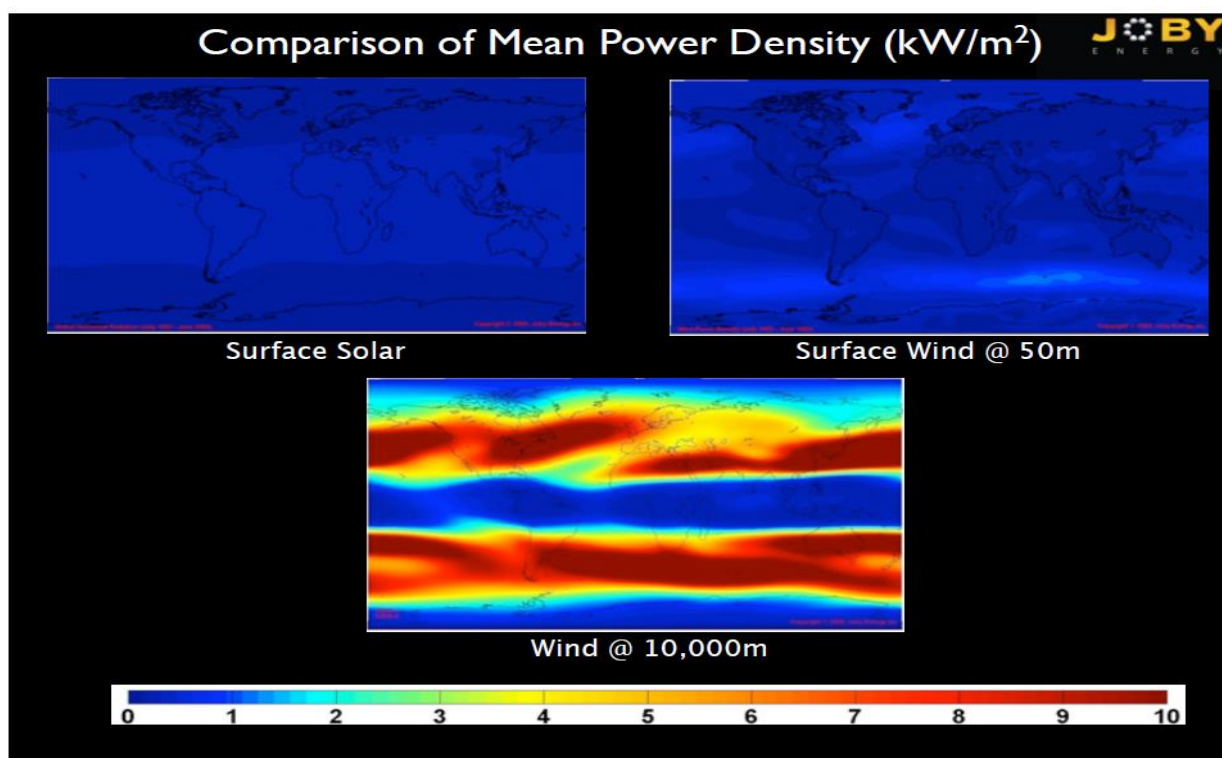
Гиропланер – управляемый воздушный змей, ГАС – большой воздушный змей с системой управления и безопасного возвращения.

- Деревья, здания, вышки, воздушные змеи, пилотажные управляемые кайты, буксируемые змеи, все привязные аэродинамические летательные аппараты, фактически, **не перемещаются в воздушном пространстве** и по определению (ВК и ПВП) **не являются пользователями воздушного пространства**.
- Тонкая нить не представляет угрозы для самолётов и пешеходов. Воздушные змеи никогда не создавали опасных прецедентов для воздушного движения.
- При обрыве леера управляемый аэродинамический летательный аппарат совершает автоматический управляемый спуск на площадку обслуживания с заданными координатами.
- На высотах от 3000 м самолёты летают по воздушным трассам шириной 10 км (20 км вне зон обслуживания), расстояние между трассами шире >2 раза. По картам трасс и по согласованию с органами ОрВД, можно найти места подъёма, где высотные платформы будут вне трасс и эшелонов воздушного движения.
- Практика показала возможность попадания самолётом в неподвижные здания. Высотные привязные платформы (вне трасс и эшелонов) с датчиками системы уклонения способны автоматически уходить с траектории воздушных судов.
- Речные бакены и буи не мешают судоходству. Дорожные знаки и указатели не мешают автомобильному движению. **Высотные ГАС** с сигнальными огнями и отражателями на леере, с системой ADS-B (АЗН-В, автоматическое зависимое наблюдение-вещание), неизбежно скоро **станут необходимыми элементами безопасности** для организации интенсивного воздушного движения ОрВД.

Ужесточение правил регистрации, сертификации и регламента использования БЛА (в США, России, Европе) одновременно при либеральном законодательстве по отношению к привязным аппаратам (аэростатическим и аэродинамическим) открывает им **широкий рынок легального коммерческого использования**: съёмки, непрерывного мониторинга, телекоммуникаций, и пр.

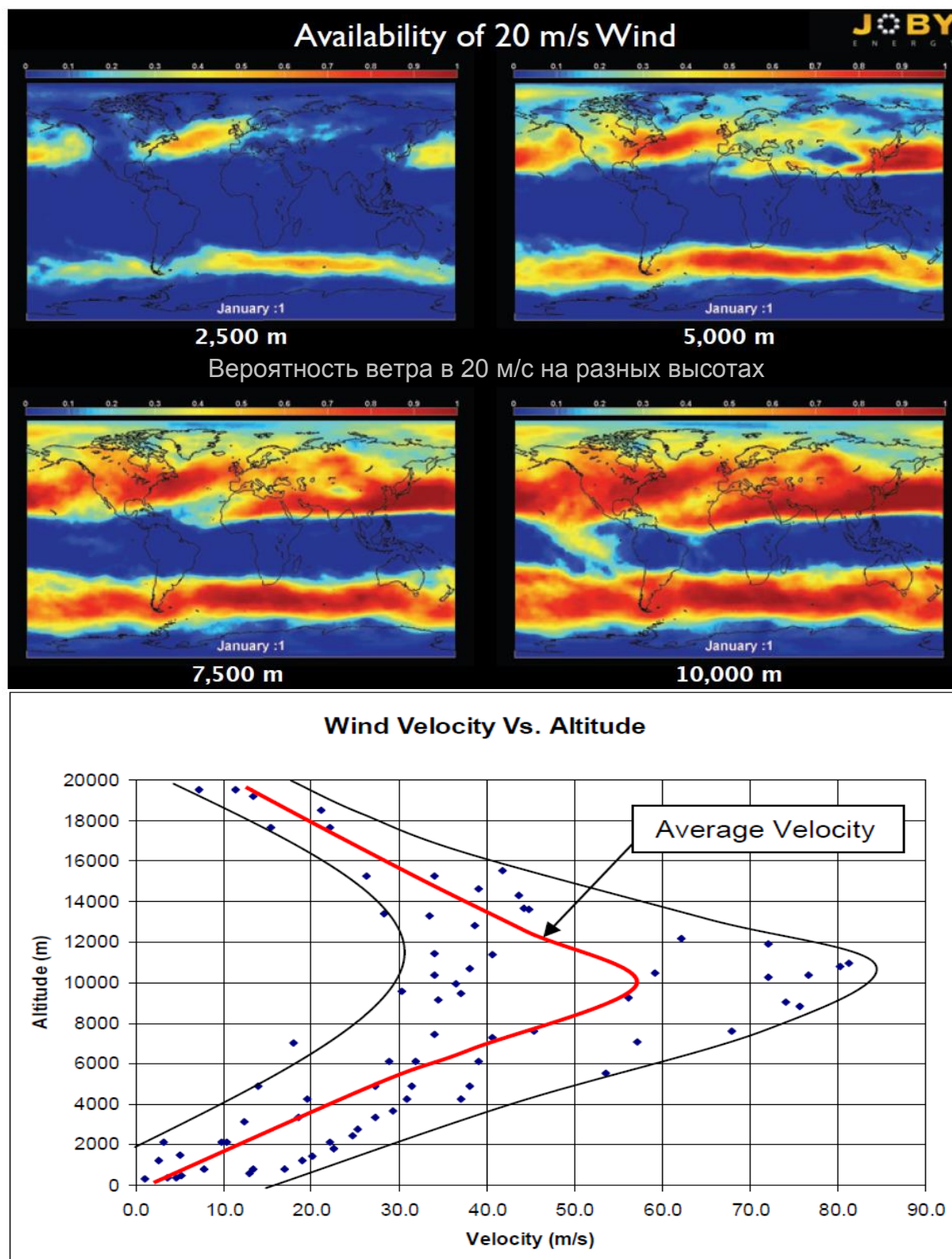
Высотная ветроэнергетика

Высотный тропосферный ветер – мощный надёжный неисчерпаемый ресурс с высокой плотностью энергии. **Плотность энергии высотных ветров многократно** превышает плотность солнечной энергии и энергии ветра у поверхности земли. Удельная мощность ветрового потока пропорциональна плотности воздуха и растёт в кубе от скорости. Увеличение скорости ветра в 5 раз, с учётом уменьшения плотности атмосферы в 3 раза, приводит к росту плотности энергии **в 40 раз!** Комплексные исследования суммированы компанией *Joby Energy*, наглядно представлено сравнение плотности солнечной, ветровой энергии у поверхности и высотного ветрового потока на высоте 10 000 м:



$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{air} v_{wind}^3$$

Важнее высокой плотности энергии может быть только **постоянство, высокая надёжность и глобальность** ресурса. Высотный тропосферный ветер надёжный распределённый неисчерпаемый ресурс, он глобален за исключением экватора и полюсов. Постоянный поток энергии высотного ветра с минимальными суточными и сезонными колебаниями обеспечивает стабильный полёт, энергетическую автономность, избавляет лёгкую привязную платформу ГАС от тяжёлых аккумуляторов.



Все исследования атмосферы фиксируют рост силы и стабильности ветра с увеличением высоты в тропосфере. В тропопаузе скорость ветра достигает максимальных значений. Наибольшие скорости (до 400 км/ч) фиксируются в высотных струйных течениях. Традиционные большие несущие винты изменяемого шага приемлемого веса не способны выдерживать такую нагрузку.

Структурно прочные Воздушные колеса ГАС работают в косом обтекании, скользят в потоке с малым углом атаки плоскостей вращения. На высокой скорости вращения центробежные силы натягивают замкнутое крыло, повышают жёсткость роторов. Несущие колёса ГАС работают в стабильном потоке высокой плотности энергии $2 \dots 10 \text{ кВт/м}^2$, без значительной потери аэродинамического качества и угла возвышения, можно снимать $\sim 10\%$ мощности потока, до 1 кВт с каждого квадратного метра ометаемой площади. При большой площади роторов ГАС мощность для телекоммуникационной аппаратуры более чем достаточна. Изменяя высоту полёта, угол атаки платформы к потоку, меняя натяжение леера и общий шаг роторов можно дозировать генерируемую мощность в широком диапазоне.

Для привязного аэродинамического летательного аппарата (в зависимости от удельной нагрузки на площадь) существует минимальная необходимая воздушная скорость V . Гиропланер с удельной нагрузкой 5 кг/м^2 может стабильно держаться на высотах $9 \dots 12 \text{ км}$ в ветровом потоке $\sim 20 \text{ м/с}$.

Если аппарат неподвижен относительно земли его воздушная скорость равна скорости ветра v . При слабом ветровом потоке в разряжённой стратосфере ГАС способен сохранять высоту и мощность генерации, совершая широкие галсы поперёк ветра, увеличивая площадь сбора энергии потока и воздушную скорость V . Воздушная скорость может многократно (пропорционально аэродинамическому качеству) превышать скорость ветра v . С ростом воздушной скорости $V = Kv$, подъёмная сила растёт в квадрате $Y = 1/2 \rho S C_y (Kv)^2$, мощность потока возрастает в кубе $P_w = 1/2 \rho (Kv)^3$.

Максимальная возможная высота полёта привязной аэродинамической платформы ГАС находится над тропопаузой в нижних слоях разряжённой стратосферы $12 \dots 15 \text{ км}$, в зоне снижения скорости ветра. Чем выше аэродинамическое качество и чем меньше удельная нагрузка на несущую площадь ГАС, тем шире диапазон доступных высот полёта.

Наземные ветроэнергетические установки не могут работать в штиль и при ветре более 22...24 м/с, от разрушения конструкции спасает только остановка роторов. Ураганы, тайфуны, смерчи гуляют исключительно в нижних слоях тропосферы. Высотные ветра стабильны, без порывов и турбулентции.

Избыток ветрового напора используется на увеличение угла возвышения, на подъём высоты полёта в более спокойные разряжённые слои стратосферы. Таким образом ГАС скользит над мощными струйными течениями тропопаузы, находится в безопасной устойчивой зоне нижней стратосферы на высотах 12...15 км с оптимальной скоростью потока для стабильного полёта с большим углом возвышения и необходимого уровня энергоснабжения полезной нагрузки.

Стабильная высокая плотность энергии потока в тропопаузе определяет энергетические возможности геостационарного атмосферного спутника и выгодно отличает его от других технологий высотных платформ, основанных на энергетике больших солнечных панелей с тяжёлыми аккумуляторами. Разрыв на порядок в плотности энергии периодической солнечной энергии и постоянного высотного ветрового потока влечёт огромную разницу в размерах, массе и стоимости высотных платформ.

Большая высота подъёма базовой станции и высокая мощность нисходящего сигнала - условие обеспечения высокой скорости, дальности и надёжности связи, особенно в высокочастотных диапазонах, снимается зависимость связи от метеоусловий, упрощаются требования к конечной аппаратуре, улучшается приём внутри помещений.

Для телекоммуникаций, текущих и будущих потребностей мобильного широкополосного доступа, **геостационарные атмосферные спутники (привязные высотные аэродинамические платформы на роторах воздушное колесо)** вне конкуренции по всем важнейшим параметрам: располагаемой мощности, капитальным и операционным затратам, скорости развёртывания, автономности, надёжности, экологичности.

Экология связи

Хотя энергопотребление отдельной базовой станции невелико и составляет в среднем 3...7 кВт, затраты на энергоснабжение составляют 50%...60% от всех операционных затрат. Подсистемы операторов сотовой связи насчитывают сотни тысяч базовых станций, поэтому снижение энергозатрат открывает значительные возможности для снижения себестоимости связи.

На современном уровне хозяйственной деятельности на первый план выходят проблемы экологии. Экологическая безопасность - определяющий фактор, влияющий на стоимость любой технологии. Системы связи - основа современной цифровой экономики. Высокие темпы роста отрасли накладывают особые требования на решения с большим потенциалом масштабирования.

Все попытки индустриализации Арктических территорий сопровождались чудовищным загрязнением среды. Основу энергоснабжения Арктических районов составляют 47000 малых дизельных электростанций, при себестоимости энергии 30...100 руб/кВт*ч, **без учёта стоимости ликвидации экологических последствий завоза топлива в бочках.**



Страшные реалии «освоения Арктики»: россыпи ржавых бочек до горизонта.

Экологически чистая связь может опираться только на децентрализованную экологически чистую энергетику от **надёжных возобновляемых источников**. Главная проблема традиционных возобновляемых источников энергии - **нестабильность**. Солнечные панели бесполезны полярной ночью, наземные ветряки большую часть времени только украшают пейзаж. Расплата за ненадёжность закономерна, всю экологичность солнечных батарей и наземных ветрогенераторов полностью убивает использование мощных аккумуляторов. Химические аккумуляторы - дорогой расходный материал, имеют короткий срок службы до 3-5 лет, их промышленное производство наносит колоссальный вред окружающей среде, а стихийная утилизация - катастрофична. Экологические последствия от токсичных куч отработанных свинцовых аккумуляторов страшнее россыпей ржавых бочек.

Геостационарный атмосферный спутник

Геостационарный атмосферный спутник ГАС – высотный (тропосферный / стратосферный) привязной аэродинамический летательный аппарат на несущих роторах воздушное колесо. Экологически чистый ГАС использует надёжный глобальный источник энергии – высотный ветер, единственный источник энергии доступный полярной зимой в нижней стратосфере. Главные качества чистой высотной ветроэнергетики – глобальность и стабильность, высокая плотность энергии, обуславливает малый вес и стоимость платформ ГАС. При минимальных капитальных затратах развёртывания систем связи на основе ГАС имеем и наименьшие эксплуатационные издержки.



РЕШЕНИЕ

ГАС геостационарный атмосферный спутник

- высотная аэродинамическая привязная телекоммуникационная платформа

- ✓ Энергетическая автономность
- ✓ Высокая мощность передатчиков
- ✓ Минимальные размеры, масса, стоимость
- ✓ Минимальные затраты CAPEX & OPEX
- ✓ Минимальная наземная инфраструктура
- ✓ Надёжный ОВ канал до Базовой станции
- ✓ Технология работает на широтах до 80°

Высота до 15 км
Горизонт до 400 км
Радиус макросот до 100 км
Площадь макросот ~30 000 км²
Полётная масса до 1000 кг

Леер <15% массы платформы
← СВМПЭ / UHMWPE
СверхВысокоМолекулярный ПолиЭтилен
удельная прочность = 378 км
(Dyneema®, Spectra®, ...
Томскнефтехим, Казаньоргсинтез)

8

Высота привязной платформы ГАС превышает высоту вышки базовой станции примерно в 300 раз, площадь покрытия увеличивается в 300 раз, радиус зоны покрытия увеличивается до 100 км. Одна экологически чистая высотная платформа способна заменить сотни вышек с проблемами энергоснабжения, сократить большое количество мелких и дорогих в содержании электростанций.

Увеличение радиуса соты до 100км требует многократного увеличения мощности сигнала базовой станции. Технологии атмосферных спутников на солнечных батареях имеют большие проблемы с энергетикой, даже в умеренных широтах, летом. Не способны летать в высоких широтах, зимой.



Сравнение технологий НАПС

Большая располагаемая мощность ГАС, и высокая мощности сигнала связи даёт технологическую совместимость с существующими системами сотовой связи, прежде всего, на стороне абонента, работает в помещениях без громоздких антенных систем и специальных абонентских терминалов. Это принципиальное качественное преимущество технологии ГАС над конкурентными системами телекоммуникаций космических и атмосферных спутников, сложно переоценить для лёгкого вхождения и успешного продвижения на существующем конкурентном рынке сотовой связи. Абонент со своим смартфоном получает свободу перемещения, сплошную зону МШПД за пределами мегаполиса.

Энергетически автономные ГАС образуют соты больших размеров, способны быстро покрывать гигантские территории с низкой плотностью населения, а также успешно наращивать абонентскую базу на территориях, покрытых сотовой связью.

Существующие стандарты связи и аппаратура LTE поддерживают дальность связи до 100км. Разрабатываемые стандарты 5G / IMT-2020 также поддерживают размер сот радиусом более 100км. Базовая станция, поднятая в стратосферу с мощными передатчиками и чувствительными приёмниками, технологии ЦАР, massive MIMO, формирование лучей (beamforming), позволяет покрывать обширные территории макросотами радиусом 100км, площадью более 30 000км². Система схожа и совместима с системами сотовой связи, та же структура, крупнее масштабы. Возможны и более сложные иерархические схемы беспроводной связи «Макросота ГАС – наземная минисота – абонент».



Мобильная связь 6G

Для районов с низкой плотностью абонентов на большой дальности актуальна технология WiMAX основанная на стандарте IEEE802.16, а также разработан специальный стандарт IEEE802.22 WRAN беспроводных региональных сетей, описывающий архитектуру связи на «свободных» частотах телевизионного вещания VHS/UHF (54 – 862 МГц) на скорости передачи до 22 Мбит/с.

Бурно растущий сегмент IIoT приоритетно опирается на беспроводные сети. Так, например, LPWAN (Low-power Wide-area Network – «энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия») беспроводная технология передачи небольших по объёму данных на дальние расстояния, разработанная для распределённых систем телеметрии, межмашинного взаимодействия и интернета вещей.

Энергетическая автономность ГАС экономически эффективно решает проблему надёжного бесперебойного энергоснабжения телекоммуникационной аппаратуры, независимой от состояния наземной инфраструктуры. Дополнительные оперативные мощности связи и контроля оперативно разворачивается в любом месте, постоянные высотные ветровые потоки есть над всей территорией России.

Новая технология телекоммуникаций на основе высотных привязных аэродинамических платформ ГАС способна обеспечить сплошную зону МШПД над всей поверхностью суши и прибрежных акваторий, кроме экватора и полюсов. Рынок беспроводных технологий к 2020 году оценивается в 4.5 триллионов USD.

Транспортная сеть связи

Итак, только **геостационарные атмосферные спутники ГАС** способны эффективно решать сложнейшую проблему связи - «проблему последней мили» включая территории с низкой плотностью населения в единое информационно-экономическое пространство. С известными технологиями HAPS разрыв в стоимости на порядки, и в капитальных, и в операционных затратах. Высотные платформы – это, ретрансляторы, носители базовых станций (БС), являются вершинкой большого айсберга, видимые верхние элементы большой и сложной системы. Транспортная сеть сотовой связи включает в себя сложный участок между БС и опорной сетью. Комплексная задача построения транспортной сети с высотными БС имеет специфику и проблемы.

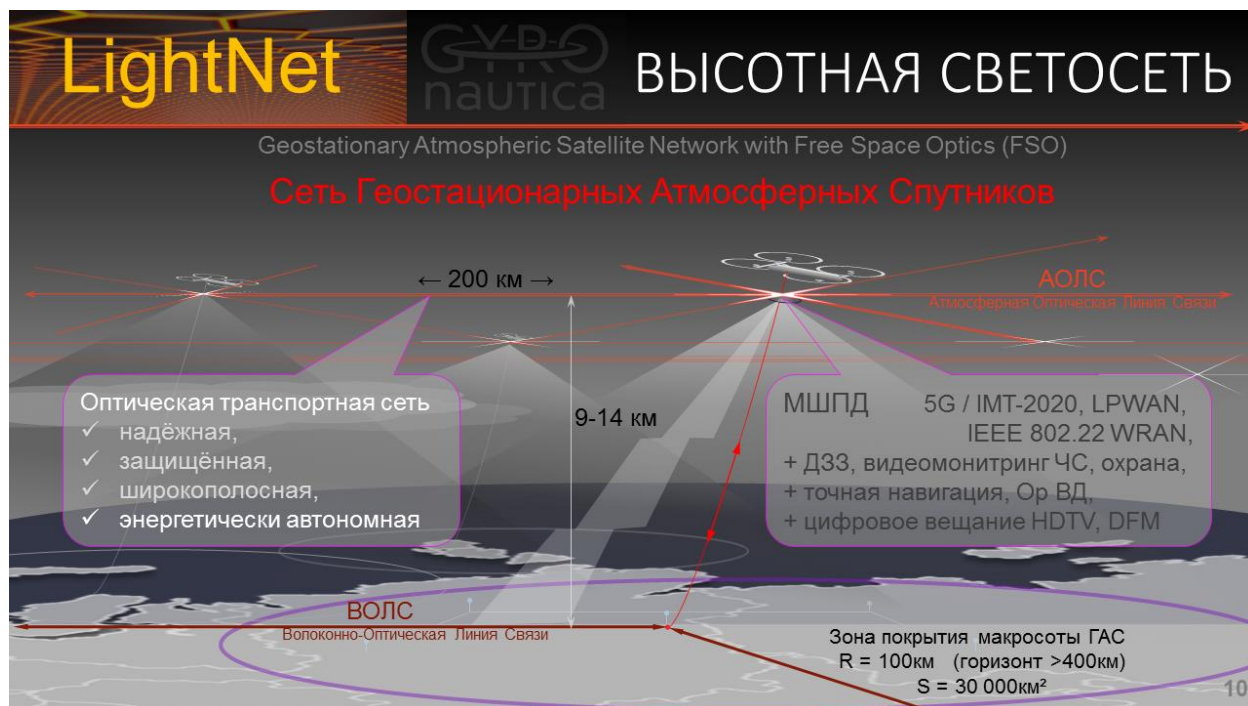
Так, проекту спутниковой связи Starlink (для спасения SpaceX), предусматривающему вывод и поддержание группировки 12 000 КА, необходим миллион наземных станций обеспечения и бюджет более \$10млрд.

Технологиям HAPS, низкоорбитальным космическим и атмосферным спутникам-ретрансляторам необходима постоянная связь (на основе радиоканалов ограниченной пропускной способности через большие подвижные узконаправленные антенны) с дорогостоящей наземной инфраструктурой, станциями управления сетью, согласования с внешними сетями. Необходим постоянный доступ к магистральным каналам и системы надёжного энергоснабжения. Потому высокая стоимость атмосферных спутников позволяет разворачивать лишь локальную связь. Практически все альтернативные проекты атмосферных спутников вынуждены опираться на ресурсы геостационарных спутников связи, соответственно, имеют ограниченную ёмкость, космические задержки сигнала и космические цены для абонентов.

* * *

Неуместно подробно расписывать системные проблемы каждой технологии HAPs, хотя только в сравнении и можно оценить лаконичную красоту транспортной и магистральной инфраструктуры системы сотовой связи на сети ГАС (LigthNet). **Минимализм и мощь технологии ГАС заключена в тонком оптоволоконном подвесе**, заменяющем всю подводную часть айсберга наземной инфраструктуры HAPS, снимает проблемы её возведения, содержания и энергоснабжения. Оптоволоконный подвес узлового ГАС надёжно напрямую соединяет систему в точках обмена интернет-трафиком с кабельной оптикой, опорной сетью Интернета.

Минимальная наземная база зонального ГАС – столб с автомеханической лебёдкой натяжения леера. Леер узлового ГАС содержит оптоволоконный канал, помехозащищённый, закрытый, надёжный и эффективный интерфейс с ВОЛС. Базовая станция может находиться «на земле», удалённо, поднимается только компактная чувствительная цифровая антенная решётка (ЦАР), энергоёмкие передатчики с направленными секторными антеннами. ГАС образуют соты МШПД в зоне радиусом ~100км, располагаются на расстоянии до 200км друг от друга, обеспечивают сплошную зону покрытия.



Леер ГАС с оптоволоконным каналом открывает возможности эффективным системам широкополосного доступа на основе **гибридного соединения оптоволоконно-радиоканал** (ГСОР, HFR – Hybrid Fiber Radio), основные положения которого определены в Рекомендации МСЭ-Р F.1332. Идея ГСОР довольно проста. Если оптическая несущая промодулирована информационным сигналом 20...60ГГц, он выделяется фотодетектором и передаётся через миллиметровый тракт. Аналогично легко происходит и обратное преобразование сигнала из миллиметрового в оптический диапазон с последующей передачей в ВОЛС. [4]

Атмосфера радиопрозрачна (в диапазоне длин радиоволн 1см...30м) две высотные платформы над Москвой и Санкт-Петербургом (~634км) уже с высоты >7км имеют прямую радиовидимость. Радиорелейная связь между платформами ГАС теоретически возможна на большой дальности до 800км, но габариты антенн, энергетика, метеозависимость высокочастотных диапазонов, требования пропускной способности, помехозащищённости, необходимость лицензирования и

согласования частотных ресурсов делают уместным рассмотрение альтернативных технологий беспроводных соединений точка-точка. С высоты 10км на дистанциях до 350км есть прямая оптическая видимость.

От узловых платформ подключённых к магистральным ВОЛС к зональным базовым станциям (БС) соседних платформ перспективны **атмосферные оптические линии связи - АОЛС** (известная технология **FSO - Free Space Optics**, пока терминология не устоялась в разных источниках встречаются аббревиатуры,

АОСП – Атмосферные Оптические Системы Передач,

БОКС – Беспроводные Оптические Каналы Связи,

БОССП – Беспроводные Оптические Системы в Свободном Пространстве,

ЛАЛ – Лазерные Атмосферные Линии).

Скоростные, энергетически эффективные, атмосферные оптические линии АОЛС в приземном слое имеют фатальный недостаток, являются метеозависимыми, для надёжности связи дублируются радиорелейными каналами. Атмосферные осадки, плотные туманы, тучи, кучевые облака, пылевые бури и прочие преграды оптической связи бывают в нижних слоях тропосферы до 4...6км. Подъём в стратосферу снимает метеозависимость, обеспечивает высокую надёжность атмосферного оптического канала связи. Над тропопаузой, на оптимальной для полёта ГАС высоте 12...14км в нижней стратосфере плотность атмосферы ниже в 4-5 раз отсутствует влага и пыль. Тонкие перистые облака стратосферы оптически прозрачны. Редкие и кратковременные забросы грозовых конвективных потоков в верхние слои тропосферы (<10км) поднимают одновременно границу тропопаузы и высоту аэродинамической платформы.

Дальность прямой геометрической видимости $D(\text{км})$ между объектами над морем и ровной поверхностью Земли рассчитывается по формуле [11]:

$D_{BL} < 3.57(\sqrt{h_B} + \sqrt{h_L})$, где, h_B , h_L – высота базы и объекта в метрах.

Максимальная дальность оптической видимости с учётом рефракции атмосферы:

$D_{BL} = 3.86(\sqrt{h_B} + \sqrt{h_L})$, видимый горизонт: $R = 3.86 \sqrt{h_B}$

Снижение луча Δh (м) атмосферной связи на дальности $D(\text{км})$:

$\Delta h = (D / 7.72)^2$

Луч атмосферной связи двух платформ на дальности 200км теряет 671метр высоты, потеря высоты на дальности 350км составит более 2км (2055м). То есть, подъём ГАС на 700м над верхней границей облачности тропосферы обеспечивает надёжную оптическую связь на дистанции ~200км. Подъём с запасом высоты >2км обеспечит дальность оптической связи на ~350км.

Атмосферная оптическая магистральная сеть

Важнейшие проблемы сети связи – транспортные и магистральные линии. Огромные территории России имеют свою специфику. Проблемы прокладки магистральных ВОЛП описал технический директор GlobalNet Владимир Веденеев: *«В России несколько естественных монополий – это энергетики, Росавтодор, железная дорога, сельскохозяйственные угодья и нефте(газо)проводы. Как ни странно, хуже всего ситуация обстоит с, наименее сложной по части освоения территорией – полями. Потому, что "поля" – это совхозы, лесхозы и много чего ещё, и, в результате, чтобы проложить магистраль, нужно сделать проект, а потом ещё – с каждым из этих товарищей договориться. Это очень трудоёмкий процесс, поэтому проекты, которые идут по земле в России, можно пересчитать по пальцам. Остальные же естественные монополии, в любом случае, тянут так называемую технологическую оптику по своей основной инфраструктуре... В России присутствует проблема огромных расстояний, поэтому многокилометровые магистрали невероятно долго себя окупают».*^[12]

В результате 50 лет эволюции и конкуренции, на земле доминируют ВОЛС, являются основой опорной сети Интернета. Технологии АОЛС имеют нишевое применение на коротких дистанциях в тропосфере (и на сверхдальних - в космосе). В сухой и чистой стратосфере ситуация меняется, на передний план выходят важные преимущества АОЛС над ВОЛС и экономика:

- Скорость света в атмосфере на 50% выше, чем в стекле.
- Разряжённая стратосфера прозрачнее оптоволокна.
- В стратосфере отсутствуют нелинейные искажения сигнала.
- Воздух «дешевле» и «долговечнее» оптоволоконного кабеля.
- В стратосфере нет частных собственников.

На высотах 12...14км между ГАС экономически выгодно и целесообразно использовать атмосферные оптические линии передач (АОЛС), что позволит организовать высокопроизводительную транспортную сеть на гигабитных скоростях, уже на текущем уровне развития технологии FSO.

Закаты и восходы создают проблемы для фиксированной оптической связи, ГАС способны менять положение, смещаться более 2км по высоте и по азимуту. Сеть динамической конфигурации имеет большой запас надёжности связи, кратковременное выключение одного канала между узлами сети не фатально.

Отсутствие нелинейных искажений в атмосфере открывает технологиям АОЛС резервы значительного увеличения пропускной способности, а также позволяет рассматривать варианты перспективных линий квантовой связи.

При близких соотношениях текущего уровня пропускной способности, **стоимость линий АОЛС и ВОЛС могут различаться в десятки раз.**

Например, реализованный в 2017 проект прокладки <1800 км подводной кабельной ВОЛС Камчатка-Сахалин-Магадан обошёлся в 5 млрд. ₽. Каждые 200км ПВОЛС на практике в среднем стоят более 555 млн. ₽.

Для сравнения, в сети полного покрытия каждый ГАС имеет 6 каналов АОЛС с 6 соседними платформами длиной по 200км. Сейчас стоимость гигабитных FSO-систем находится в диапазоне \$100 000 - \$200 000, есть предложения 10Гбит систем. Сухая прозрачная стратосфера бесплатна, стоимость каналаобразующей аппаратуры АОЛС с системой автоматического выравнивания на встречный луч, при серийном производстве реально уложить в бюджет до 10 млн.₽.



ГАС образуют одноранговую сеть, (**wireless optical mesh network**) транзитную автономную систему (AS) из связанных **узловых** и **зональных** маршрутизаторов, базовых станций макросот МШПД диаметром ~200км. Узловые ГАС поднимаются над точками обмена интернет-трафиком (Internet Exchange Point, IXP) обеспечивающими сопряжение с магистральными волоконно-оптическими линиями передач (ВОЛП).

Магистральные сети, как голые стволы и ветви деревьев, не дают тени, не обеспечивают покрытия связью. Мелкая листва БС наземных вышек сотовой связи и широкие макросоты ГАС на ветвях таких деревьев обеспечат сплошное покрытие территорий мобильным широкополосным доступом. Таким образом, **сеть ГАС эффективно решает обе проблемы связи: магистральных сетей передачи и «проблему последней мили».**

Геостационарное атмосферное ДЗЗ

Космический аппарат дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) не более раза в день пролетает над заданной точкой, а вероятность попасть в благоприятные условия для съёмки целевого района выпадают несколько раз в году. Максимальное разрешение снимков с орбиты имеет ограничения 1м/пиксель. Процессы обработки и «рассекречивания» снимков от КА двойного назначения занимает около двух недель. Сложность формирования заявок, низкая оперативность и высокая себестоимость космической съёмки не устраивает потенциальных потребителей. При космической стоимости аппаратов и цене выведения на орбиту, о коммерческой рентабельности их нецелевого использования рассуждать не приходится. На текущем уровне развития БЛА способны выполнять съёмку оперативнее, качественнее и дешевле.

Каждый геостационарный атмосферный спутник контролирует зону радиусом 100км при радиусе горизонта ~400км. Сеть ГАС позволяют вести **непрерывный мониторинг обширных территорий**, прибрежных акваторий, воздушного пространства, государственной границы, транспортных магистралей, трубопроводов, лесов, сельскохозяйственных полей. Оптимальное сочетание преимуществ фиксированной базы и близких расстояний позволяет увеличивать разрешение до высоких значений, необходимых потребителю.

Видеоконтроль в реальном времени с фиксированной базы радикально сокращает **объём информации** для передачи, обработки и хранения. Принципиальное отличие от съёмки с подвижной базы (порождающей гигантские потоки фрагментированных **данных** низкого качества) полный контроль нижней полусферы с фиксированной базы даёт **качественную информацию** минимального объёма с фиксированной геодезической привязкой и автоматическим выделением подвижных объектов в реальном времени. Автоматизируются поисково-спасательные работы, охрана. Возможен контроль событий и процессов в динамике (цейтраферная видеосъёмка, таймлапс) строительства объектов, добычи ресурсов, развитие с/х культур, вырубки лесов, ...

Большая располагаемая мощность и большая высота позволяют вести непрерывный радиолокационный обзор нижней полусферы высокого разрешения, вести контроль воздушного пространства (ДРЛО), контролировать акваторию 200-мильной исключительной экономической зоны и морские коммуникации.

Сверхточная региональная навигация

Положение навигационных спутников вычисляется с ограниченной точностью из параметров орбиты, дополнительные ошибки вносят многие факторы, от гравитационных влияний, до искажений слабого навигационного сигнала при прохождении ионосферы. В итоге точность систем спутниковой навигации измеряется метрами. Слабый метеозависимый навигационный сигнал подвержен помехам, подавлению, подмене. Орбитальная скорость навигационных спутников ~4км/с, ГАС стабилен или плавно смещается со скоростью до 20м/с (<20мм/мс). Разница в 200 раз отражается в точности и мощности сигналов.

Привязная платформа способна вычислять собственное местоположение с **сантиметровой точностью** по данным 4-5 радиодальномеров относительно 4-5 фиксированных наземных отражателей с известными координатами. Сеть ГАС с высоты 10...14 км даёт пользователю на открытой местности до 19 навигационных сигналов прямой радиовидимости, один ГАС в зените и по 6 на дальностях ~200км, ~350км, и ~400км. Для сантиметрового позиционирования достаточно сигнала 3-4 ближайших ГАС. Мощный навигационный сигнал с короткой дистанции (ближе в 100...1000 раз) не подвержен ионосферным, метеорологическим, промышленным и внешним помехам. Упрощаются требования к антеннам и приёмникам абонента, точная навигация возможна внутри зданий.

Сантиметровая точность и надёжность позиционирования открывают качественно новые возможности. Автомобили смогут держать полосу движения автоматически, без ошибок систем технического зрения. Летательные аппараты смогут надёжно автоматически точно мягко садиться в любых погодных условиях. Миллиметровая точность необходима в строительстве, точному земледелию, ...

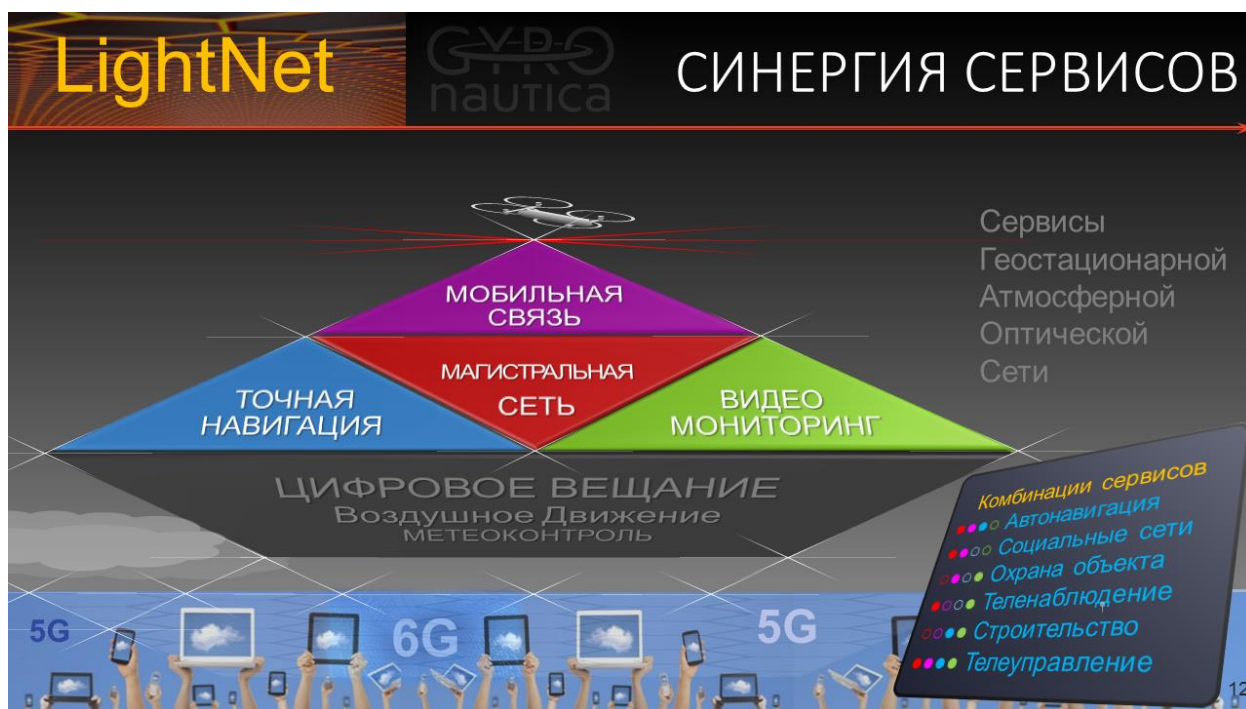
Решающий фактор – экономика, капитальные и операционные затраты. Капитальные затраты на каждую зону ГАС, на борту: 5 радиодальномеров, микропроцессорный вычислительный блок, передатчик навигационного сигнала. На земле: 5 отражателей на заглубляемых держателях. Всё.

Капитальные затраты возведения национальной системы сверхточной навигации минимальны, а операционные издержки ничтожны. Без космических трат на космодромы, на одноразовые ракеты поддержания численности группировки одноразовых спутников, издержек на службы обслуживания, управления, коррекции.

Система региональной сверхточной навигации способна дать поддержку ГЛОНАСС, стать дополнением системы спутниковой навигации (ДГНСС, СДКМ).

Синергия сервисов

Мощная чистая высотная ветроэнергетика позволяет геостационарным атмосферным спутникам выполнять 90% функций космических аппаратов на качественно новом, более высоком уровне, с несравнимо меньшими издержками. Сеть ГАС многократно расширяет и умножает эти уникальные возможности, до полного комплексного покрытия **страны, региона, континента** в единое цифровое пространство.



Мультиспектральный видеоконтроль, радиолокационный контроль нижней полусферы в реальном времени с точной географической привязкой открывают широкие возможности, контроля транспортных потоков, охраны объектов инфраструктуры, трубопроводов, границ, исключительной экономической зоны, экологической и пожарной охраны. Есть отличия от эпизодической фотосъёмки.

Человек – слабое звено безопасности на транспорте. Сверхточная навигация, мобильная связь и видеоконтроль позволят поднять безопасность автоматических перевозок на качественно новый уровень. Автоматические летательные аппараты вертикального взлёта и посадки, транспортные и пассажирские, получают возможность безопасного плотного воздушного движения с централизованной системой управления и контроля.

Сейчас сотовая связь ненадёжна уже от высоты 100м, не приемлема для управления БПЛА. При законодательной дискриминации стихийных пользователей БПЛА действенен не тотальный контроль, а возможность предоставлять легальным сертифицированным дисциплинированным операторам доступ к

комплексным, централизованным ресурсам телеуправления и удобным сервисам безопасного совместного использования воздушного пространства. Операторы БПЛА получают широкий надёжный канал связи в тропосфере, надёжную точную навигацию, видеоконтроль сверху за пределами наземной видимости.

Десяток компактных лёгких датчиков на леере ГАС позволяет вести комплексный метеорологический контроль параметров тропосферы на всю высоту. Эфирное вещание (FM, DTV, HDTV, UHDTV) с высокой энергетикой ГАС имеет прямую видимость и сплошную зону устойчивого покрытия цифрового сигнала.

Бурное развитие телекоммуникаций сопровождается экспоненциальным ростом энергопотребления и численности дата-центров, центров обработки данных (ЦОД). Важнейшие проблемы ЦОД: бесперебойное энергоснабжение и охлаждение аппаратуры, начинают оказывать давление на глобальную экологию. Рост значения, бурное развитие телекоммуникаций - базы современной цифровой экономики, требует поиска экологически безопасных решений.

Только в нижней стратосфере есть три ключевых ресурса для периферийных вычислений (Edge Computing): энергия, охлаждение, сеть. Стабильный поток экологически чистой энергии сухого чистого воздуха имеет постоянную температуры -56.5°C. Сеть ГАС даёт прямой доступ к скоростным каналам атмосферной оптической связи. Именно там высокая совокупная электрическая мощность высотной распределённой вычислительной сети может достигать огромных значений без ущерба для экологии планеты.

Важнейшие сервисы, исполненные на буквально высоком уровне широкой сети геостационарных атмосферных спутников:

- **сеть передачи данных,**
- **сеть сотовой связи, МШПД,**
- **сверхточная навигация,**
- **комплексный мониторинг** в реальном времени территорий, прибрежной акватории, воздушного пространства,
- цифровое эфирное вещание,
- метеоконтроль тропосферы, управление воздушным движением и т.п.

по отдельности имеют огромные значения, а сочетание сервисов в едином комплексе даёт качественно новые результаты колоссальной ценности, демонстрируют синергию сервисов, составляют мощную базу единого комплексного информационного пространства, инфраструктуру развития **цифровой экономики** государства. В перспективе, мощный интеграционный ресурс, ядро единой континентальной сети.

Источники

1. Вильгрубе Л.С. Вертолёты. Расчёт интегральных аэродинамических характеристик и лётно-технических данных. М. Машиностроение, 1977.
2. Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX Путь к 4G М. Техносфера, 2010
3. Джонсон У. Теория вертолёт. В 2-х книгах. Пер. с англ. М.: Мир, 1983.
4. Ильченко М.Е., Кравчук С.А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. - К.: "Наукова думка", 2008
5. Карачевский Г.И. Аэродинамика. Физические основы подъёмной силы и аэродинамического сопротивления материальных тел. ИПХФ РАН, 2010.
6. Степутин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. В 2-х томах. Инфра-Инженерия. 2021
7. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. М. Наука, 1964.
8. Современное состояние гидродинамики вязкой жидкости. Тома 1,2. М. Иностранная литература, 1948.
9. <http://www.nkj.ru/archive/articles/3223/> АИСТ в ветровом потоке.
10. https://en.wikipedia.org/wiki/Jet_stream
11. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Горизонт>
12. GlobalNet: Мы не смотрим на Россию, как на единственный рынок.
<https://nag.ru/articles/article/103367/globalnet-myi-ne-smotrim-na-rossiyu-kak-na-edinstvennyiy-ryinok.html>
13. Патент РФ на группу изобретений №2538737 от 21.11.2014, опуб. 10.01.2015.
«Ротор “воздушное колесо”. Гиростабилизированный летательный аппарат и ветроэнергетическая установка, использующие ротор “воздушное колесо”, наземное/палубное устройство запуска».
14. Патент США US10967964B2 от 6.04.2021. Заявки ЕС, Китая, Канады.

* * *

Gyronautica LLC
CEO Кузиков С.Ю.
<http://gyronautica.ru/rnd/platforms/>
gyronautica@mail.ru
gyronautica@gmail.com