

# РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Казанцева Е.С., Сидняев Н.И.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия

Sidn\_ni@mail.ru, kazan\_ls@mail.ru

*Аннотация. В статье представлены системы мониторинга и прогнозирования окружающей обстановки: сопредельных территорий РФ. Веб-ГИС-технологии позволили объединить спутниковую, наземную и прогностическую информацию от удаленных друг от друга организаций. Пользователю предоставляется быстрый доступ к массиву данных через веб-браузер для принятия своевременных управленческих решений.*

*Ключевые слова: веб-сервисы, мониторинг окружающей среды, геоинформационная система, спутниковые изображения.*

## Введение

Применение спутников Земли в зондировании получило широкое признание с начала проведения Международного геофизического года, когда спутники впервые стали серьезно рассматриваться в качестве геофизического инструмента [1]. Правда, даже в настоящее время не имеется соединений с каким-либо значительным улучшением точности определения положений. Геодезисты и другие специалисты не ощущают полностью трудностей, возникающих при использовании искусственных спутников Земли для уточнения положения станций наблюдения [2]. С другой стороны, они не могут полностью осознать замечательной чувствительности искусственного спутника как инструмента для изучения поля тяготения Земли. Причина этого несоответствия состоит в том, что некоторые гравитационные эффекты накапливаются с увеличением количества оборотов в виде возмущений орбитального движения; неправильности наложения станций наблюдения трудно отличить от ошибок того же порядка, возникающих при наблюдениях за спутником. Таким образом, применение спутников для целей геодезии развивается медленно, так как в первые же годы прямые исследования окружающего Землю космического пространства пролили свет на удивительную сложность неконсервативных сил и неравномерности потенциальных полей в той области, которую обычно считали пустым, холодным и главное простым пространством [3]. Однако в последние годы об этом далеко не простом окружении было получено достаточно сведений, чтобы еще раз оправдать оптимизм в вопросе улучшения положений станций с помощью тщательно продуманной системы геодезических спутников. Рассмотрение наилучшего варианта схемы такой системы и ее практического применения и является темой работы.

Из сказанного выше ясно, что улучшенные положения геодезических станций до настоящего, времени не являются «побочным продуктом» существующей системы слежения за спутниками. Очевидно, чтобы иметь искусственный спутник Земли в качестве точного геодезического инструмента, необходимы особые усилия. Задача, таким образом, состоит в оптимизации параметров наблюдения и оптимизации распределения станций наблюдения. Выражение «параметры наблюдения» скрывает за собой сложные вопросы, касающиеся точности и частоты наблюдений, расположения станции, а также необходимого наземного и бортового оборудования. Один только последний вопрос обуславливает возможность построения многих схем наблюдения, так как каждая из трех координат положения и трех составляющих скорости спутника (по отношению к наблюдателю) может быть измерена электронными и оптическими способами с различным успехом.

Вероятно, лишь такие методы, как фотографирование звезд для определения абсолютных углов, измерение дальности радиолокационными средствами и измерение скорости вдоль луча зрения при помощи доплеровского сдвига частоты в радиодиапазоне, позволяют надеяться на получение достаточной точности при использовании геодезического спутника в ближайшем будущем [4]. Однако еще не существует полностью согласованного мнения относительно, а) оптимального соотношения оптических и радиолокационных измерений, б) относительных достоинств радиолокационных систем непрерывного действия и импульсных радиолокационных систем точного измерения дальности и в) применимости разработанных в настоящее время доплеровских систем измерения скорости вдоль линии визирования для систем с геодезическим спутником.

Неясно также состояние вопроса об оптимальных параметрах орбиты. Некоторые геодезисты желают применять способ одновременного наблюдения, т.е. простую экстраполяцию метода триангуляции со световым сигналом; в этом случае спутник одновременно наблюдается несколькими станциями. Такие одновременные наблюдения позволяют определять относительную ориентацию и положения станции наблюдения независимо от каких-либо допущений относительно орбит или характеристик поля тяготения Земли. Другим геодезистам представляется, что большая точность может быть получена при наблюдении за спутником в более благоприятных геометрических условиях и при использовании орбиты в качестве средства для интерполяции на промежутке от одной системы наблюдений до другой [5]. При этом наблюдения осуществляются не одновременно. Ввиду того, что оба метода несовместимы ни для какой отдельной орбиты, следует выбирать тот метод, для которого применение данного спутника является оптимальным. Меньше споров вызывает вопрос об оптимальном наклонении орбиты; однако предлагаемые значения этого угла колеблются в диапазоне 50-90°.

Таким образом, задача оптимизации наблюдений и параметров орбиты для улучшения координат станций приводит к огромному количеству возможных решений без какого-либо порядка или логической последовательности. Очевидно, что прежде, чем сформулировать практические рекомендации по поводу получения геодезических данных с помощью наблюдений за спутником, следует выяснить некоторые основные закономерности. Такие закономерности легко получаются в результате тщательного анализа задач геодезического спутника.

## 1. Геодезические задачи

По традиции геодезию связывают с определением точного положения контрольных пунктов на поверхности Земли. Сведения, полученные на этих пунктах, представляют собой как бы отдельные элементы, из которых складываются данные о таких величинах, имеющие большое научное значение, как размер и форма Земли и характеристики ее поля тяготения. Теоретически такие контрольные пункты могут быть отнесены к вращающейся декартовой  $(X, Y, Z)$ , сферической  $(\rho, \psi, \lambda)$  или эллипсоидальной  $(R, \varphi, \lambda, e, a)$  системам координат. Указанные координатные системы имеют своим центром центр масс Земли; одна их ось совпадает со средним направлением полярной оси Земли, а другая расположена в меридиональной плоскости нулевой долготы [6]. Эти системы являются эквивалентными формами геоцентрической координатной системы. Однако на практике невозможно отнести положение точек на поверхности Земли к центру масс Земли. Ввиду этого для практических приложений пришлось допустить два основных отклонения от геоцентрической системы координат:

Горизонтальные расстояния углы между триангуляционными станциями тщательно выверяются относительно фиксированной начальной точки  $\varphi_{G^0}, \lambda_{G^0}$  и начального опорного азимута  $A_{G^0}$  (Мы здесь предполагаем, что все начальные величины получены астрономическими методами). В качестве вычислительной модели для приведения измерений на плоскости к известной криволинейной системе используется опорный эллипсоид с заданными величинами большой полуоси и сплюснутости. Результирующие геодезические координаты контрольных пунктов  $\varphi_G, \lambda_G$  относятся, таким образом, к опорному геодезическому центру и позволяют определить, какой именно нормали опорного эллипсоида соответствует каждый контрольный пункт. Геодезические оси выдерживаются параллельно осям геоцентрической системы с высокой точностью путем частого определения геоцентрического направления местной вертикали астрономическими методами [7]. Однако первоначально принятые геодезические координаты  $\varphi_{G^0}, \lambda_{G^0}$  опорного центра геодезической сети отличаются от истинных геоцентрических координат  $\varphi, \lambda$  той же точки на некоторую малую, но неизвестную величину, так как центры геодезического и геоцентрического эллипсоидов не совпадают. В соответствии с этим два малых смещения  $R\Delta\varphi_{G^0}$  и  $R\Delta\lambda_{G^0}$  плюс небольшая поправка  $\Delta A_{G^0}$  опорного азимута достаточны, чтобы привести систему геодезических координат  $\varphi_G, \lambda_G$  контрольных пунктов в полное согласие с системой геоцентрических координат  $\varphi, \lambda$  для той же самой системы пунктов в предположении, что для геоцентрического эллипсоида используется тот же эксцентриситет  $e$ . Однако величинами  $\varphi_G$  и  $\lambda_G$  определяются только две из трех координат положения центров сети, и поэтому сеть не является полной координатной системой [7]. Чтобы иметь право говорить о полной геодезической системе координат, для каждого пункта следует установить третью координату, зависящую от  $H$ .

Высота над уровнем моря  $h$  определяется относительно геоида-эквипотенциальной поверхности, соответствующей среднему уровню моря. Но эта опорная поверхность для установления вертикали является поверхностью нерегулярно волнистой. Наклон геоида относительно сети опорных пунктов определяется путем сравнения измеренного геоцентрического направления местной вертикали на станциях, имеющих координаты  $\varphi_G, \lambda_G$ , с вычисленным направлением нормали к опорному эллипсоиду для этих же станций. Результирующую карту высот геоида  $N_G$  над спорным эллипсоидом получают суммированием значений наклона. Однако, поскольку эта карта базируется на нормалях к опорному эллипсоиду, а не к геоцентрическому, существуют систематические расхождения между  $N_G$  и  $N$ . Эти расхождения ликвидируются перемещением на величины  $R\Delta\varphi_{G^0}$  и  $R\Delta\lambda_{G^0}$ , которое приводит к совпадению геодезической и геоцентрической нормалей. Производится также исправление начального астрономического азимута; эта поправка  $\Delta A_{G^0}$  получается непосредственно по истинной геоцентрической долготе. Следовательно, для завершения преобразования геодезической системы координат в геоцентрическую необходимо лишь третье простое смещение на  $R\Delta$  всего геоида вдоль нормали  $\varphi_{G^0}, \lambda_{G^0}$ .

Таким образом, система геодезических положений  $\varphi_G, \lambda_G$ , отнесенная к сети геодезических опорных пунктов, плюс высота над уровнем моря  $k$  и вычисленные высоты геоида  $N_G$  можно рассматривать как особую эллипсоидальную систему координат, которая отличается от геоцентрической эллипсоидальной системы с теми же параметрами  $a$  и  $e$  на три малых смещения:  $R\Delta\varphi_{G^0}, R\Delta\lambda_{G^0}, R\Delta$ . В переменных геоцентрической сферической системы координат  $(\rho, \psi, \lambda)$  каждая компонента смещения  $\Delta\rho, \Delta\rho\psi, \Delta\rho\lambda$ , вероятно, не превосходит 170м для центров главных опорных сетей, расположенных в Северной Америке и Европе. В дополнение к этим систематическим ошибкам в геоцентрической системе координат главсистемы триангуляции подвержены случайным ошибкам, порядок которых, по общему мнению, равен от 1/100000 до 1/200000 длины для расстояний от 200 до 1600 км.

Для станций, не отнесенных к главным опорным сетям, неопределенность геоцентрического положения быстро возрастает до предельных случаев изолированных островов Антарктики или других изолированных областей, где для определения положения в геоцентрической системе используются лишь астрономические методы. В таких условиях возможны ошибки в величинах  $\psi$  и  $\lambda$ , соответствующие расстояниям порядка 600м и ошибка в величине  $\rho$  порядка 150-300м (если нет топографической съемки).

## 2. Методы наблюдений

Поскольку главные опорные сети имеют первостепенную важность при определении положения станций наблюдения и уже с наибольшей точностью отнесены к геоцентрической системе координат, критерием минимизации  $\sigma_p$  системой геодезического спутника является простое уменьшение среднего значения  $\bar{\sigma}_p$  – главной опорной сети. Наихудшее значение  $\sigma_p$  для главных опорных сетей в настоящее время может оказаться равных 240 м, однако 150 м является более правдоподобной, но все еще пессимистической величиной. В соответствии с этим ожидаемое значение  $\sigma_p$  для средней станции наблюдения должно быть значительно меньше 150м, чтобы данная система геодезического спутника представляла какой-либо реальный интерес. Значение  $\sigma_p = 60$ м подходит как абсолютный критерий минимальной точности для любой системы спутников, которая разрабатывается главным образом для целей геодезии. Это приблизительно наибольшее значение  $\rho_p$ , основываясь на котором, можно ожидать, что будет достигнуто статистически существенное уточнение геоцентрических положений имеющихся станций наблюдения, расположенных в пределах главных опорных сетей. Если ожидаемое значение  $\sigma_p$  будет лежать между 60 и 150 м, то станет вполне вероятным, что такая система геодезического спутника будет неспособна обнаружить ошибки в ранее принятых геоцентрических положениях указанных станций наблюдения. Верхний предел желаемой точности системы геодезического спутника имеет, конечно, меньшее значение, так как уже нижний предел требует применения для наблюдений наиболее точного оборудования, существующего в настоящее время. Однако стоит заметить, что если бы было желательно иметь значение  $\sigma_p < 6$  м, то возникли бы серьезные трудности в отношении точности существующих базовых линий. Следовательно,

требование к точности системы геодезического спутника должно заключаться в том, чтобы  $\sigma_p$  для станций наблюдения находилось в пределах от 60 до 6 м. Эти цифра соответствуют приблизительно  $10^{-5}$  и  $10^{-5}$  радиуса Земли.

Итак, необходимая точность системы характеризуется величиной  $60\text{ м} > \sigma_p > 6\text{ м}$ . Необходимая точность индивидуальных наблюдений не определяется полностью величиной  $\sigma_p$ , так как при полном анализе ошибок орбита также должна приниматься во внимание. Однако здесь, видимо, уместно отметить, что систематическая составляющая ошибки наблюдения  $E_S$ , как правило, не должна превышать  $\sigma_p / 2$ . Если десять успешных наблюдений принять за типичное количество наблюдений, производимых с одной станции, то на практике случайная составляющая ошибки  $E_R$  будет уменьшена примерно на 1/3. Теперь можно приближенно заключить, что минимальное условие имеет вид:

$$E_S + E_R / 3 < \sigma_p.$$

Для наихудшего случая значение  $\bar{\sigma}_p = 60\text{ м}$  (это грубое приближение) дает максимальное значение  $E_R$  около 90 м и одновременно значение  $E_S$  около 30 м. Расчетное значение  $E_R$  следует брать, вероятно, порядка 15 м, так как 1) все рассмотрение проведено нами для наихудшего случая и 2) на практике значение  $E_S$  трудно значительно снизить, поскольку оно связано с ошибками самой станции.

Единственной полностью испытанной системой наблюдения, способной удовлетворить указанным требованиям к точности измерений, скажем, для спутника с наклонной дальностью 1800 км и произвольным углом возвышения, является система баллистических камер (фототеодолитов), разработанная специально для точного слежения за снарядами и используемая совместно с мощным источником мигающего света на борту спутника. Браун описывает интересный метод обработки данных и анализ ошибок систем с баллистическими камерами, которые применяются в настоящее время на Атлантическом полигоне реактивных снарядов. Можно считать, что ошибки измерения кажущегося прямого восхождения  $\alpha'$  и кажущегося склонения  $\delta'$  источника мигающего света для существующих систем будут порядка 2-4". Большая часть этой ошибки носит случайный характер; она обусловлена ошибками обработки изображений на фотопластинках и ошибками наводки и может быть уменьшена в 2-4 раза путем дополнительных наблюдений. Поэтому, применяя систему с одной баллистической камерой, для двух из трех необходимых координат положения спутника, можно получить точность измерений 2" (1:100 000). С помощью системы с баллистической камерой время наблюдения, также отмечается с необходимой точностью. Система является полностью мобильной. В настоящее время находятся в эксплуатации или же вскоре поступят в эксплуатацию несколько десятков баллистических камер, включая аэрофотокамеры с фокусным расстоянием 36 и 40 дюйм (915 и 1015 мм), которые были модифицированы одновременно Кембриджской исследовательской лабораторией ВВС и Годдардовским центром космических полетов для использования в качестве баллистических камер с точностью, в два раза превышающей указанную выше.

Камеры Бэйкер-Нанн для слежения за спутниками также, по-видимому, способны обеспечить точность 2-4", но до сих пор они не применялись с соответствующим оборудованием регистрации и синхронизации времени, чтобы накопить какое-либо существенное количество наблюдений указанной точности. Представляется разумным предположение, что в течение примерно двух лет существующие и проектируемые станции слежения Бэйкер-Нанн смогут обеспечить точность наблюдений 2-4" и распределение ошибок, подобное распределению в баллистических камерах. Будет введено в действие, вероятно, около 18 хорошо размещенных станций.

Наконец, некоторые астрономические телескопы при использовании совместно с источником мигающего света могли бы производить измерения с точностью 0,5-1", но такая точность еще не была продемонстрирована на практике. Для телескопов в настоящее время нет оборудования для точного отсчета времени вспышек источника света, как и для камеры Бэйкер-Нанн. Кроме того, относительно малое поле зрения телескопа ограничивает число дополнительных вспышек, регистрируемых на одной пластинке, и таким образом до некоторой степени препятствует уменьшению случайной ошибки, возникающей при измерении координат на пластинке. Итак, в настоящее время имеется оборудование для фотографирования звезд, способное обеспечить точность измерения  $\alpha'$  и  $\delta'$  до 2". В течение короткого времени будет оборудовано значительное количество подвижных и стационарных пунктов наблюдения, обеспечивающих указанную точность измерений на базе существующей техники, а

также, несколько станций с точностью 1". Точность 2" соответствует ошибке 18м на расстоянии 1800км и, следовательно, на этой дальности примерно согласуется с желаемой величиной  $E_R$ .

Однако при использовании геодезического спутника имеются серьезные ограничения, связанные с применением оптического оборудования для определения положения. Во-первых, угловая ошибка обуславливает линейное возрастание величины ошибки действительного положения спутника с возрастанием наклонной дальности. Величина угловой ошибки 2" при наклонной дальности 9000км соответствует линейной ошибке 90 м - верхнему пределу для случайной ошибки, согласно проведенному ранее анализу. Во-вторых, точность и пригодность наблюдений начинают падать при углах возвышения меньше 20° и падают очень быстро при углах возвышения меньше 10°. Эти потери точности обусловлены главным образом нелинейным искривлением хода лучей в атмосфере, а также уменьшением числа и ухудшением распределения используемых звезд в окрестности исследуемого изображения. Кроме того, видимость горизонта во всех направлениях в местах полевых наблюдений достигается исключительно редко. Третьим и наиболее серьезным является то, что оптические наблюдения строго ограничены ночными периодами, когда отсутствует сумеречное освещение, и периодами хорошей и очень хорошей видимости. Предполагая, что время пригодных условий освещенности за сутки составляет в среднем 45%, а удовлетворительные условия видимости - 50% (довольно оптимистическое предположение для многих районов земного шара), получаем, что типовой геодезической станцией может быть использовано менее 14 теоретически возможных оборотов спутников. Если желательны одновременные наблюдения с двух или более оптических станций, далеко отстоящих друг от друга, то вероятное число успешных одновременных наблюдений за месяц оказывается в самом деле слишком малым. Это приводит к увеличению затрат на одно удачное наблюдение. Таким образом, мы неожиданно сталкиваемся с крайне важным понятием эффективности систем геодезического спутника. Ясно, что затраты на одно удачное наблюдение должны быть минимальными. Для подвижных станций этот вывод означает, что должна быть максимальной скорость накопления удачных наблюдений. На практике наблюдения с неподвижных станций часто возможны лишь в определенные периоды времени, обусловленные либо характеристиками орбит, либо противоречивыми требованиями к оборудованию станции (т. е. к астрономическим телескопам).

В соответствии с этим было бы желательно максимально увеличить число этих наблюдений в определенные периоды времени. Вообще говоря, эффективность как подвижной, так и неподвижной станций возрастает при увеличении скорости накопления наблюдений.

По этой причине методы точного измерения дальности радиолокационными станциями имеют в любой программе геодезических спутников первостепенную важность несмотря на то, что в настоящее время их точность и надежность в применении спутникам еще недостаточна [7, 8]. Возможность использования радиолокационной системы измерения дальности почти при любых погодных условиях приводят к увеличению эффективности программы наземных наблюдений по сравнению с оптической системой в 3-4 раза, а в некоторых случаях – о много раз больше. В настоящее время основным фактором, тормозящим применение радиолокационных станций (как непрерывного действия, так и импульсных) для точного измерения дальности, является то, что, несмотря на заявления изготовителей о высокой точности станций, имеется мало экспериментальных данных точности измерения дальности в микроволновом диапазоне для цели, летящей над ионосферой.

Экстраполяция экспериментальных данных, полученных для малых высот и небольших дальностей, несомненно, указывает, что для значительного диапазона изменения наклонной дальности можно получить ошибку измерения дальности 15 м или меньше в предположении, что на спутнике установлен приемопередатчик с достаточной мощностью на выходе.

Вследствие этого можно предположить, что через два года или несколько позже измерение дальности при помощи радиолокаторов будет играть по крайней мере одинаковую роль с оптическими методами для любого геодезического спутника. К этому времени будут проведены испытания радиолокационных станций на точность; кроме того, будут разработаны приемопередатчики и другое оборудование, пригодное для использования на геодезических спутниках.

Суммируем влияние ошибки фотографирования звезд и измерения дальности с помощью радиолокаторов на точность определения положения геодезического спутника.

Точность убывает с возрастанием наклонной дальности. При фиксированной оптической частоте или мощности выходного сигнала бортового оборудования спутника в сантиметровом диапазоне точность радиолокационных измерений с возрастанием наклонной дальности выше некоторого номинального значения может падать быстрее, чем по линейному закону, в то время как точность оптических измерений в зависимости от дальности изменяется почти по линейному закону.

Точность падает с уменьшением угла возвышения, особенно когда угол меньше 10°.

Эти выводы приводят к двум другим, которые имеют очень большое значение при выборе оптимальной орбиты:

Необходимо предельно уменьшать среднюю наклонную дальность и изменение наклонной дальности полезных наблюдений на всех станциях.

Следует избегать малых углов возвышения, особенно углов меньше  $10^\circ$ .

Прежде чем приступить к рассмотрению вопроса о выборе орбиты, уместно отметить преимущества одновременного проведения радиолокационных измерений и фотографирования звезд, так как ошибка дальности направлена вдоль линии визирования объекта, а угловые ошибки перпендикулярны к этому направлению, то одновременные измерения дальности и угла дают возможность при помощи статистических методов повысить точность в два раза или более по сравнению с отдельным измерением координат положения. Подобным же образом может быть осуществлено даже большее повышение точности определения положения спутника, если производить одновременное независимое измерение радиальной скорости. Такое уточнение координат может быть выполнено особенно успешно, если принять во внимание некоторые известные динамические соотношения Меррея и Лиса между скоростью и положением. Однако во всех случаях, для того чтобы одновременные измерения дали сколько-нибудь значительную выгоду, точность измерения компонент должна быть одного порядка.

### 3. Заключение

В работе предложено техническое решение по организации автоматизированной обработки данных КА. Для решения задачи были выбраны широко используемые и регулярно обновляемые в ГИС-сообществе библиотеки работы с растровыми данными.

Предложенные подходы ДЗЗ основаны на открытых данных и открытом программном обеспечении, которое активно применяется сообществом для решения задач как по обработке и подготовке тематических продуктов ДЗЗ, так и для построения систем сбора, трансформации и хранения больших объемов данных, в том числе для построения данных.

Предлагаемый подход был апробирован для обработки данных, получаемых в режиме прямого вещания с космических аппаратов. Подход ДЗЗ позволил достичь:

- высокой степени автоматизации всего цикла обработки данных (с момента получения до момента публикации в геопортале) – пользователь осуществляет только мониторинг и при сбоях происходит восстановление работоспособности;
- низкой стоимости реализации (данные и программное обеспечение являются открытыми);
- высокой степени масштабируемости за счет использования программного обеспечения из стека больших данных;
- алгоритмов обработки данных ДЗЗ и создания тематических продуктов, апробированных сообществом и рекомендуемых для использования;
- уменьшения времени на рутинные процессы специалистов по обработке данных (специалистов тематической обработки).

Для повышения эффективности ДЗЗ требуется обеспечить:

- использование контейнеров Docker для гибкости развертывания и масштабируемости ДЗЗ;
- расширение перечня тематических продуктов, в том числе с различных космических аппаратов и сенсоров;
- консолидацию результатов обработки с различных космических аппаратов и сенсоров для повышения точности тематических продуктов.

Работа направлена на реализацию данных мероприятий и дальнейшему совершенствованию ДЗЗ. Следует отметить, что использование веб- и ГИС-технологий значительно укоряет процесс доставки продукции пользователю и существенно уменьшает затраты. Веб-сервисы с результатами спутникового и наземного мониторинга можно легко подключить к геоинформационным системам пользователей. Использование систем ГИС позволяет эффективно объединить разнотипные спутниковые, наземные и прогностические данные, полученные от разных организаций, в виде веб-сервисов и отобразить полную картину состояния окружающей среды в единой системе.

### Литература

1. Чурсин А. А., Жиганов А. Н. Методические положения оценки мероприятий стратегического планирования с целью повышения вклада результатов космической деятельности в реальный сектор экономики России. Бизнес в законе // Экономико-юридический журнал. 2016. № 6. – С. 40 – 45.

2. Прохорова Е. П., Ловчинская М. В., Куриленко А. Н. Проблемы оценки экономического эффекта реализации коммерческих услуг космической деятельности // Труды МАИ: электрон. журн., 2011. – N 44. – URL: <https://mai.ru/upload/iblock/53b/problemu-otsenki-ekonomicheskogo-effekta-realizatsii-kommercheskikh-uslug-kosmicheskoy-deyatelnosti.pdf?ysclid=19sod0gg48755918933>.
3. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. – N 4. – С. 1–34. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf>.
4. Ашаина И. В. Подходы к решению задачи реконфигурации отказоустойчивой распределенной системы управления группировкой ДЗЗ малых космических аппаратов // Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского», Москва, 29 – 30 октября 2021 г. Сборник докладов. – М.: Издательский дом Академии им. Н. Е. Жуковского. 2022. – С. 269 – 276.
5. Ашарина И. В. Подходы к созданию отказоустойчивой распределенной системы управления группировкой малых космических аппаратов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции ИНФО-2021, 1 – 10 октября 2021, г. Сочи, Адлер / под. ред. С. У. Увайсова. – М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского. 2021. – 296 с.
6. Антонушкина С. В. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли // Под ред. В. В. Еремеева. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2015. – 460 с.
7. Егошкин Н. А. Повышение информативности космических изображений Земли: монография // Под ред. В. В. Еремеева. – М.: КУРС. 2022. – 368 с.
8. Егошкин Н. А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли // – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 320 с.