



УДК 551.510.535

ПРИКЛАДНАЯ ГЕОФИЗИКА ИОНОСФЕРЫ И ФАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Ю.К. Калинин¹, А.Ю. Репин¹, Е.Н. Хотенко¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

Рассматривается смысловая связь между различными разделами прикладной ионосферной геофизики и технологиями, соотносимыми к так называемому искусственному интеллекту. В ионосферной геофизике предлагается рассматривать две ветви – фундаментальную и прикладную с выделением в последней технической ионосферной геофизики. Среди технологий искусственного интеллекта рассматриваются варианты, в которых возможны создание программ для ЭВМ с выходом на потребителя – либо оператора, либо автономно действующего устройства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, ИОНОСФЕРНАЯ СЛУЖБА, ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ, МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНЯЕМАЯ ЧАСТОТА

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_30_21

1. РАСКРЫТИЕ СМЫСЛА ТЕРМИНОВ

Ионосфера. Так называют области атмосферы, газовой оболочки Земли, содержащие свободные заряженные частицы. Они возникают преимущественно как продукт воздействия на атмосферные молекулы испускаемых Солнцем фотонов и корпускул. В своей совокупности, отрицательно заряженные лёгкие частицы ионосферы, электроны обладают важной для приложений особенностью – удерживать в приземном пространстве траектории дециметровых радиоволн, излучаемых наземными источниками под определёнными углами. В соответствии с этим ниже будут в основном фигурировать свойства ионосферы высотами не более 300–400 км. То есть речь будет идти о внутренней ионосфере, находящейся ниже главного максимума концентрации заряженных частиц электронов N_e . При этом предполагается, что пространственно-временную изменчивость ионосферы можно охарактеризовать мотивировано выбранными сглаживающими функциями. Отклонения от таковых верифицируются либо как эндогенные случайные неоднородности, связанные с внутренними процессами. Либо как объекты, связанные с отчасти детерминированными экзогенными процессами. В частности, связанными с взрывными возмущениями атмосферы, а также воздействиями на ионосферу макротел и инжектируемых смесей.

Прикладная геофизика ионосферы. Рассмотрение группы наук о Земле позволяет заключить, что для многих из них допустимо разделение на фундаментальную и прикладную ветви. В равной мере это, по мнению авторов, относится и к ионосферной геофизике. При этом фундаментальность предполагает либо использование локальных в пространстве-времени законов физики применительно к рассматриваемым объектам, либо использование больших массивов ионосферных данных. И то и другое зачастую соответствует внутренним потребностям той или иной конкретной проблеме

геофизики. Другая ветвь, прикладная, имеет в виду удовлетворение информационных потребностей в смежных научных исследованиях или в иных видах технической деятельности общества.

Как, может быть, и в других научных дисциплинах, описанию объекта исследования в прикладной геофизике ионосферы целесообразно предпослать перечень основных потребителей использующих её выходные данные. К таковым относятся, главным образом, информационные радиотехнические системы, для работы которых существенно упомянутое ионосферное свойство удерживать в приземном пространстве, вплоть до значительных загоризонтных дальностей, траектории декаметровых радиоволн, излучаемых наземными источниками. Конкретно это, прежде всего, дорогостоящие системы, функционирующие в декаметровом диапазоне – радиовещания и радиосвязи. А также системы, для которых особенно важно знание упомянутых траекторий радиоволновых пакетов. Это загоризонтная ионосферная радиолокация и координатометрия отдельных удалённых радиоисточников. К ним также могут быть добавлены различные системы телеуправления космическими объектами, движущимися на ионосферных высотах.

Фундаментальная, прикладная и техническая геофизика ионосферы.

Ряд вопросов аэронавигации, теории нелинейных процессов при прохождении через ионосферные области мощных радиоволн, вопросов взаимодействия ИСЗ с разреженной плазмой и т.д. следует соотносить к фундаментальной геофизике ионосферы. При этом в случае необходимости соответствующие результаты могут быть использованы при разрешении прикладных проблем. Представляется целесообразным наряду с прикладной геофизикой ионосферы предполагать наличие технической геофизики. В неё следует включить моделирование возмущений ионосферы космической техникой. Также речь может идти об обеспечении адаптации технических систем к изменяющимся гелиогеофизическим условиям. Следует также отметить ещё одно различие между фундаментальной и прикладной геофизикой ионосферы. Оно большей частью связано с особенностями математического обеспечения этих подразделов ионосферной геофизики. Так можно утверждать, что со свойством фундаментальности в определённой мере ассоциирует локальное и по возможности строгое математическое моделирование. Здесь обычно фигурируют дифференциальные уравнения, например, кинетические, а также разного рода нелинейные конструкции. Предметом поиска являются, прежде всего, локальные эффекты. В прикладной геофизике ионосферы стремятся получить нелокальные зависимости её свойств, вплоть до планетарных. Здесь, большей частью, требуются интегралы дифференциальных уравнений, а также их первообразные в явном виде.

Следует особо подчеркнуть тесную связь функциональных представлений свойств ионосферы и функционалов, характерных для описания процессов распространения в ней декаметровых радиоволн. Для последних в принципе имеет место строгая постановка исходных локальных соотношений в виде уравнений Максвелла. Однако за исключением нескольких эталонных задач с сильно идеализированными моделями источников и среды точные решения этих уравнений не могут быть синтезированы. Но даже получение приближённых решений исходных уравнений выходит далеко за пределы прикладной геофизики ионосферы.

Искусственный интеллект. (ИИ) в идеале – свойство алгоритмических систем выполнять [творческие](#) функции, которые традиционно считаются прерогативой человека; [наука](#) и [технология](#) создания интеллектуальных [машин](#), особенно [интеллектуальных компьютерных программ](#).

Фактическая трактовка термина «искусственный интеллект».

Проблема состоит в том, что пока невозможно в целом определить, какие вычислительные процедуры следует называть интеллектуальными. Поэтому под интеллектом в пределах этой науки понимается только вычислительная составляющая способности достигать целей в мире.

Имеются следующие фактические определения ИИ:

- Научное направление, в рамках которого ставятся и решаются задачи аппаратного или программного моделирования тех видов человеческой деятельности, которые традиционно считаются интеллектуальными.
- Свойство [интеллектуальных систем](#) выполнять функции (творческие), которые традиционно считаются прерогативой человека. При этом интеллектуальная система – это [техническая](#) или программная система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы.

Структура интеллектуальной системы включает три основных блока — базу знаний, решатель и интеллектуальный интерфейс, позволяющий вести общение с ЭВМ без специальных программ для ввода данных.

- Направление в [информатике](#) и [информационных технологиях](#), задачей которого является воссоздание с помощью вычислительных систем и иных искусственных устройств разумных рассуждений и действий.

- Способность системы правильно интерпретировать внешние данные, извлекать уроки из таких данных и использовать полученные знания для достижения конкретных целей и задач при помощи гибкой адаптации.

Эксперты [НАТО](#) оперируют альтернативными понятиями ИИ:

- Способность, предоставляемая алгоритмами оптимального или неоптимального выбора из широкого пространства возможностей, для достижения целей путем применения стратегий, опирающихся на обучение или адаптацию к окружающей среде.

- Системы, созданные человеком и действующие в физическом или цифровом мире, учитывающие сложную цель и выбирающие лучшие действия (в соответствии с заранее определенными параметрами), которые необходимо выполнить для достижения поставленной цели на основе восприятия своей среды, интерпретации собранных структурированных или неструктурированных данных и обоснования знаний, полученных из этих данных.

Приведенные данные позволяют в контексте проводимого рассмотрения определить несколько видов применения методов ИИ в задачах прикладной ионосферной геофизики. А именно:

- обработка сложных двумерных оптических образов с целью определения их геометрических параметров (аналогичная задача в медицине при определении процента поражения лёгких у ковидных больных);

- сбор пространственно-распределённой информации, получаемой на мировой сети ионосферных станций, входящих в ионосферную службу (аналогичная задача для службы погоды);

- синтез служебных параметров ионосферных радиотрасс в соответствии с заявками потребителей;

- использование автоматов при определении региональных параметров ионосферы;

- использование методов ИИ для телеуправления роботами, в том числе одноразовыми роботами в пространстве Ближнего Космоса.

2. СХЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ИИ В ПРИКЛАДНОЙ ГЕОФИЗИКЕ ИОНОСФЕРЫ

Ионосферная служба. Прежде всего, отметим планетарный облик ионосферы, этого образования в газовой оболочке Земли. Для таких структур требуется текущее знание пространственно-временных свойств объекта. И здесь к середине прошлого века была сформирована такая структура, как ионосферная служба. В чём-то аналогична ранее образованной метеорологической службе. Последняя состояла из разбросанных по земле точек, в которых производились метеорологические наблюдения, состоящих в периодических измерениях параметров состояния воздуха. Эти же точки были оборудованы средствами связи с соответствующими центрами. В них осуществлялся переход от локальных данных к построению региональной картины, всего того, что называется прогнозом погоды. Аналогичная сеть станций имеется у ионосферной службы, см. рис 1.

Автоматические ионосферные станции. У существующей ионосферной службы так же имеются разбросанные по земной поверхности станции для наблюдения за состоянием ионосферы, так называемые автоматические ионосферные станции (АИС). В разные периоды их число колебалось от нескольких сотен до нескольких десятков. На рисунке 1 представлен пример расположения АИС в июне 1961 г.

Подчеркнём, что все АИС имеют связь с международными центрами данных (МЦД). Но прежде чем характеризовать деятельность МЦД, следует остановиться на устройстве самой АИС. По крайней мере, на получаемой на ней ионосферной информации.

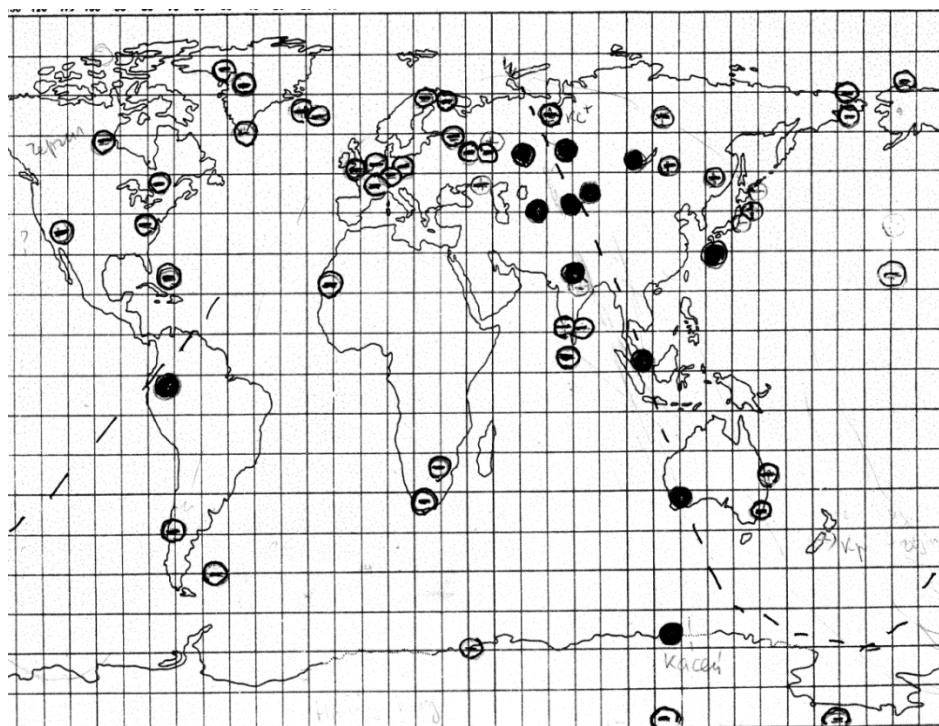


Рис. 1. Расположение действовавших АИС в июне 1961 г. (зачернённые кружочки – АИС, на которых наблюдались большие отклонения от сглаженной модели ионосферы).

АИС как регистратор состояния ионосферы. Отметим, что современная АИС представляет собой радиолокатор, функционирующий в длинноволновой части декаметрового диапазона. АИС работает циклами, длящимися несколько десятков минут, в течение которых излучаемый ею сигнал изменяет частоту излучения от одного-двух МГц до одного-полутора десятков МГц. При этом визуализируется промежуточный информационный продукт данного цикла измерений. Он имеет вид зависимости задержки отражённого ионосферой импульса от частоты зондирования. Эта зависимость носит название высотно-частотной характеристики (ВЧХ). Употребляется также термин ионограмма. На рисунке 2 приведён пример ВЧХ для дневной среднеширотной ионосферы.

На рисунке 3 приведен пример ионограммы, полученной на ионозонде ВЗ, использующем ЛЧМ-сигналы. Ионозонд расположен в местечке Торы, южнее Иркутска. На ионограмме отчётливо различаются треки двукратного отражения сигналов ВЗ ионосферы.

В обоих случаях по осям абсцисс отложена частота зондирования в МГц, а по осям ординат – высота – км.

До недавнего времени дальнейшее производство ионосферной информации было сопряжено с участием оператора. Определялись вручную такие важные характеристик ионограмм, как критические частоты f_oF и f_oE , соответствующих областей ионосферы F и E. В дальнейшем и этот участок производства ионосферной информации был автоматизирован. Подчеркнём, что это потребовало применения методов ИИ для анализа двумерных зрительных образов того же класса, что в последнее время применяются в медицине при оценке состояния лёгких больных коронавирусом.

Международный центр данных. Одна из нескольких организаций (в разных странах), куда передаются данные с мировой сети АИС, в частности критические частоты f_oF2 и f_oE . Эта информация используется для разного рода прогнозов состояния ионосферы и характеристик отражаемых ею радиоволн.

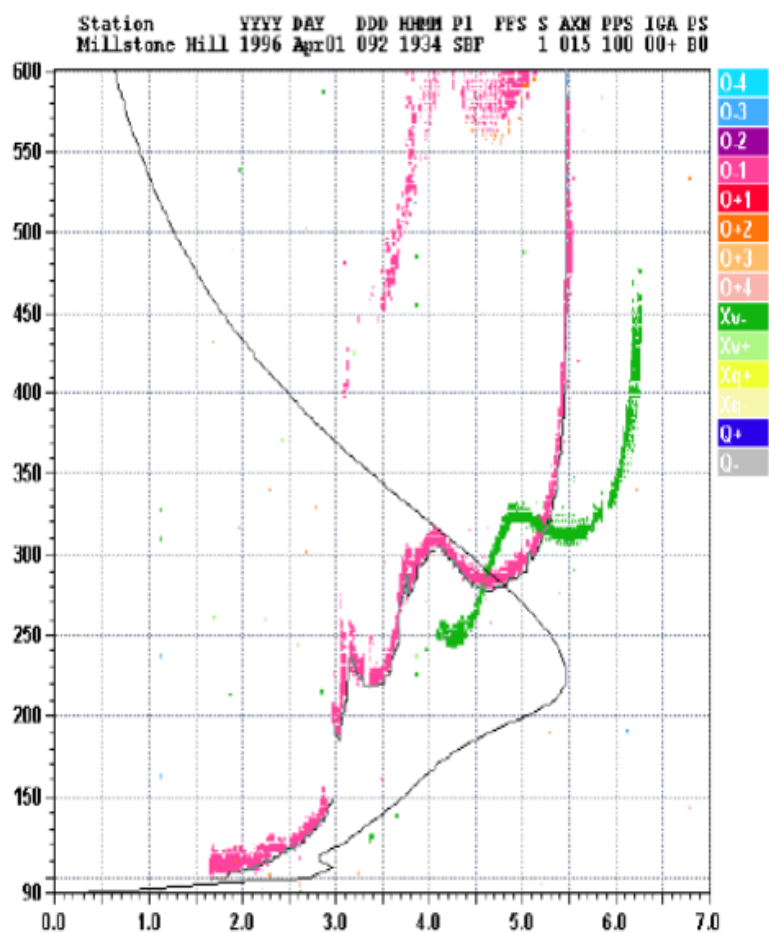


Рис. 2. Пример ионограммы – кривые, состоящие из цветных вертикальных штрихов и профиля истинных высот отражения – тонкая кривая, для среднеширотной ионосферы.

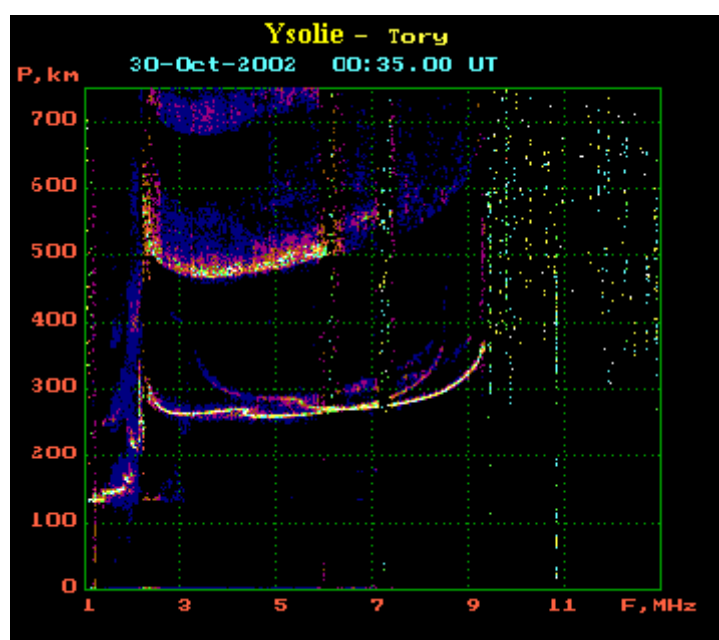


Рис. 3. Пример ионограммы современного ионозонда, использующего ЛЧМ сигнал.

Международная справочная ионосфера (IRI) – это общий постоянный научный проект Комитета по космическим исследованиям (COSPAR) и Международного союза радионауки (URSI), начатый в 1968/69 году. Это международная стандартная эмпирическая модель земной ионосферы с 1999 года. Для указанного географического положения, времени и даты IRI предоставляет среднемесячные значения электронной плотности, электронной температуры и температуры ионов, а также молекулярного состава ионов в диапазоне высот от 50 км до 2000 км. Последний стандарт – IRI-2012. С тех пор была выпущена новая версия IRI-2016. IRI был расширен до плазмосферы в модели IRI-Plas.

IRI использовал (и до сих пор имеет возможность использовать) модель ITU-R, которая была разработана в отношении распространения радиоволн через ионосферу, определяя два параметра, один из которых тесно связан с пиковым значением электронной плотности, а другой – с пиковым значением. высота ионосферы. Оба они были и регулярно определяются по ионограммам на всех станциях зондирования ионосферы. Авторы Р.М. Галлет и У. Б. Джонс проанализировали множество таких данных со всего мира методом, сочетающим анализ Фурье во времени с всемирным анализом Лежандра коэффициентов Фурье. Между тем, часто применяются региональные модели, поскольку они позволяют достичь лучших результатов на местном уровне.

Система мониторинга и долгосрочного прогнозирования ионосферы. Методика долгосрочного прогнозирования состояния ионосферы на основе «Системы мониторинга и долгосрочного прогноза состояния ионосферы» (SIMP-STANDARD), 2017 разработана в ИПГ. Следует привести примеры картографической информации, обновляемой ежемесячно по методике СИМП. Карта f_oF2 представляется в экваториальной проекции (рис. 4), либо полярной проекции (рис. 5) в виде растрового изображения с выделением изолиний f_oF2 с шагом по умолчанию 1 МГц, передающего, с использованием постоянной от изображения к изображению цветовой шкалы, значения f_oF2 над любой точкой поверхности Земли.

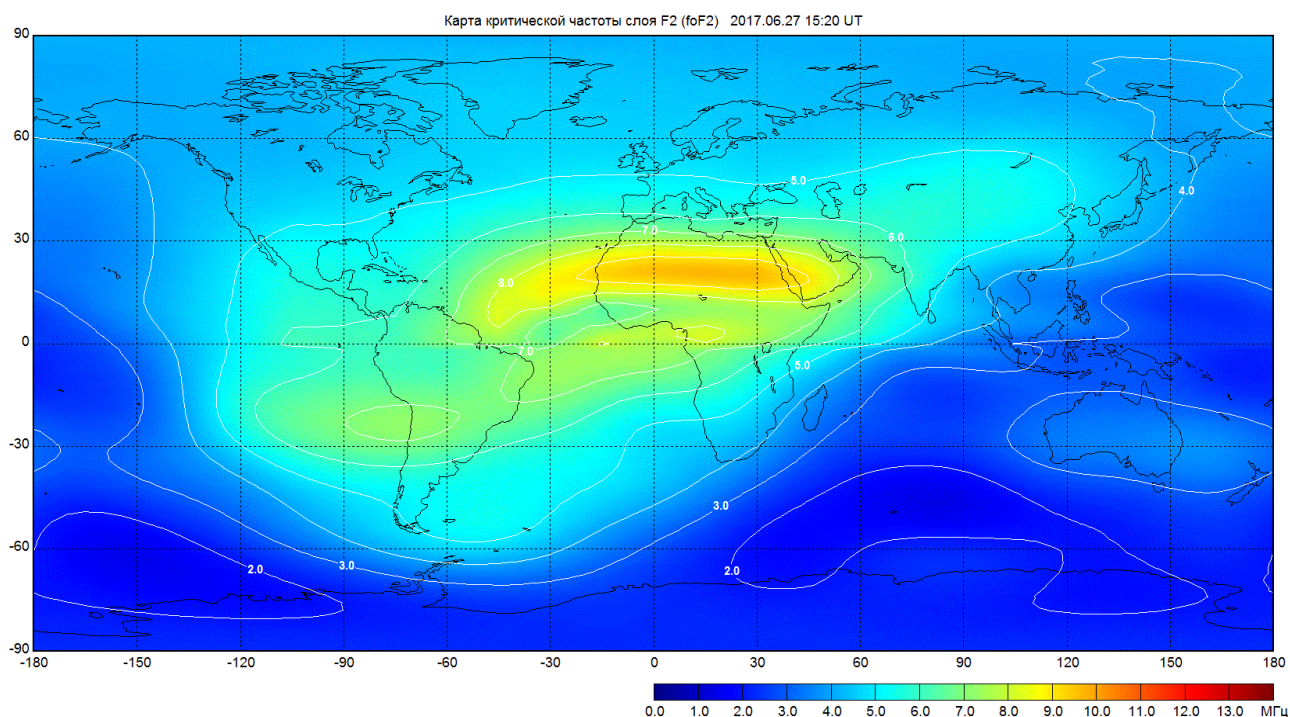
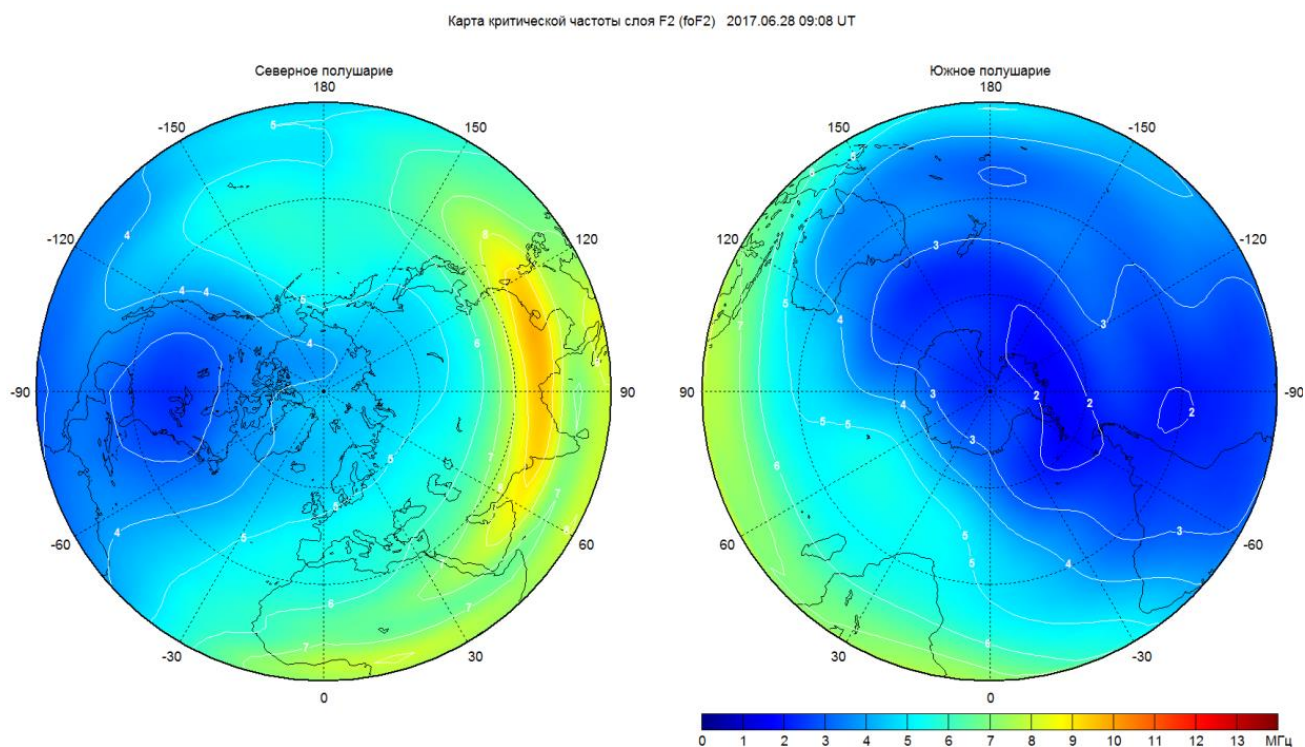
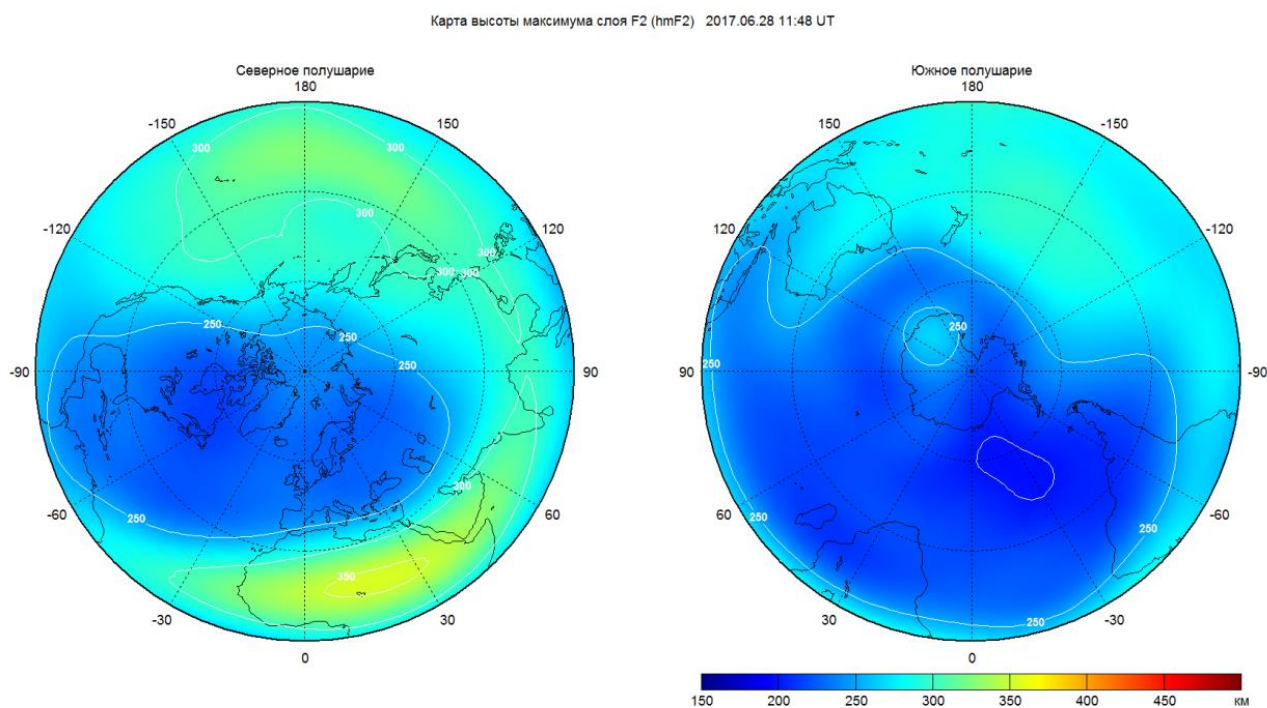


Рис. 4. Карта f_oF2 в экваториальной проекции

Рис. 5. Карта f_oF_2 в полярной проекции

Карта $h_{\max}F_2$ представляется в полярной проекции (рисунок 6) в виде растрового изображения с выделением изолиний $h_{\max}F_2$ с шагом по умолчанию 50 км, передающего значения $h_{\max}F_2$ над любой точкой поверхности Земли, с использованием постоянной от изображения к изображению цветовой шкалы.

Рис.6. Карта $h_{\max}F_2$ в полярной проекции

Карта M3000F2 представляется в экваториальной проекции (рис. 7.) в виде растрового изображения с выделением изолиний M3000F2 с шагом по умолчанию 0,2, передающего значения M3000F2 над любой точкой поверхности Земли, с использованием постоянной от изображения к изображению цветовой шкалы.

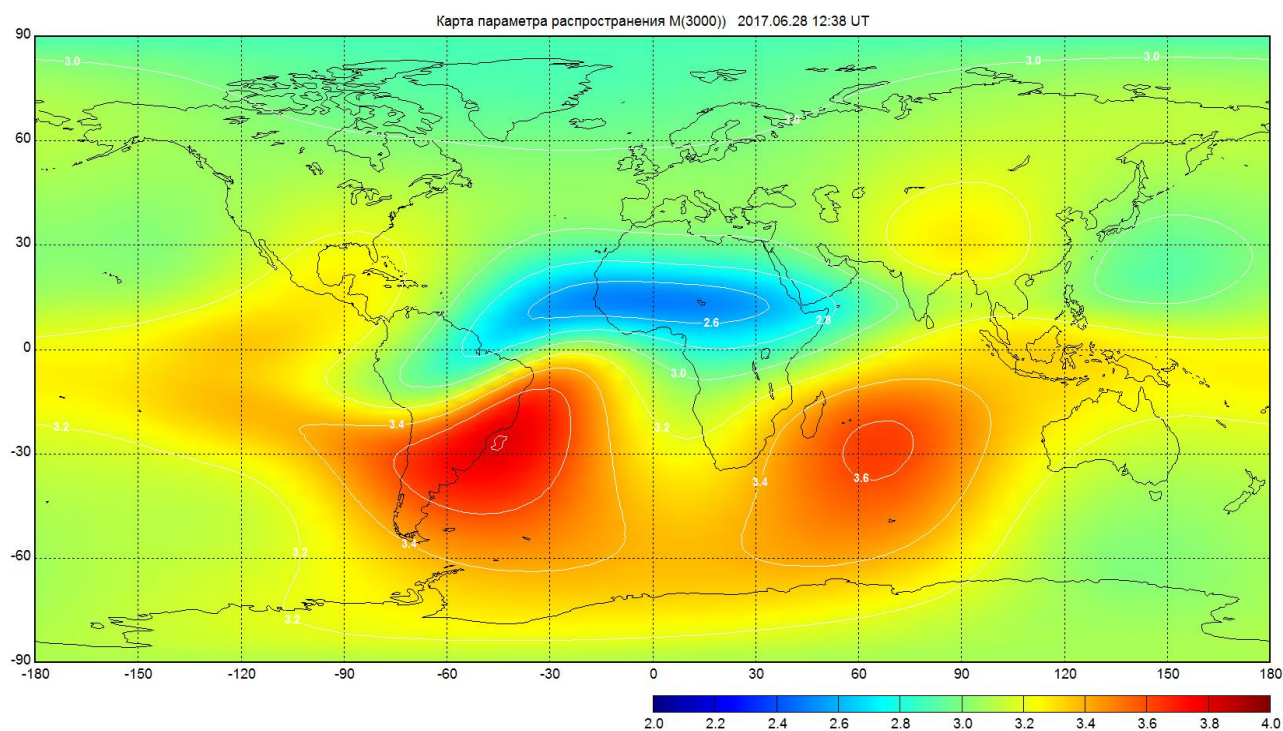


Рис. 7. Карта M3000F2 в экваториальной проекции

Следует отметить, что долгосрочное радиопрогнозирование с использованием современных модели IRI и методики СИМП, 2017 существенно эффективнее, чем долгосрочный радиопрогноз МПЧ.

Данные эксперимента по наклонному зондированию.

На рисунке 8 приведены экспериментальные данные по наклонному зондированию ионосферы.

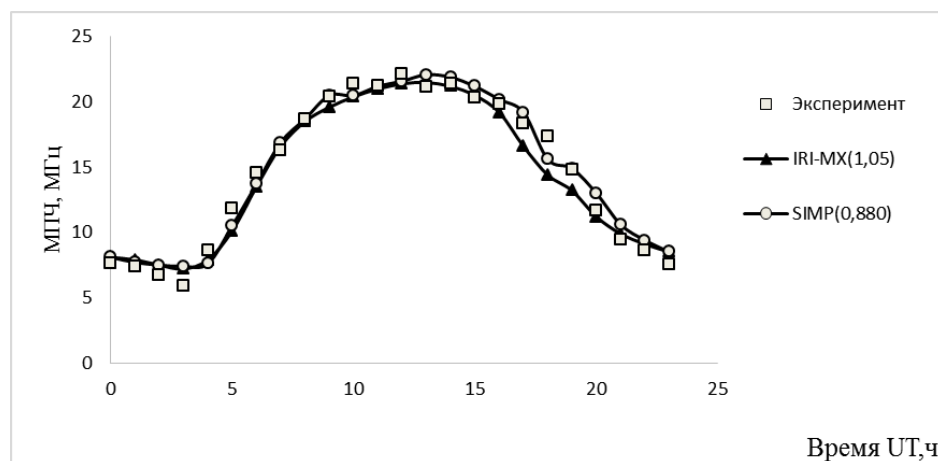


Рис. 8. Пример сравнения экспериментальных данных по МПЧ на трассе Инскипп (Великобритания) – Москва с результатами прогноза по методу СИМП, март 2004.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Даже простое сопоставление, с одной стороны, этапов процесса получения и потребления ионосферной информации с различными сторонами определения и трактовки понятия **искусственный интеллект**, с другой стороны, показывает, что между ними уже давно образовалась глубокая связь. Будь то целенаправленная обработка больших потоков информации или, например, анализ двумерных

зрительных образов и так далее. Фактически методом искусственного интеллекта в прикладной геофизике ионосферы пользуются уже давно. Вместе с тем известно, что при всяком обострении международной обстановки может возникнуть дефицит ионосферной информации, получаемой из-за рубежа. Поэтому возникает проблема построения информационной системы типа СИМП в условиях подобного дефицита. Нужны соответствующие модельные расчёты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллегам, доктору физ.-мат. наук проф. Данилову А.Д., кандидату физ.-мат. наук С.В. Журавлёву и доктору физ.-мат. наук доценту Н.Г. Котонаевой за содержательный обмен мнениями по рассмотренному выше кругу вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука. 1979. С. 568.
2. Данилов А.Д., Журавлев С. В., Котонаева Н. Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Современный системный ионосферный мониторинг и его место в геофизическом мониторинге и обеспечении безопасности. // Труды ИПГ. 2019
3. Ионосферно-магнитная служба. Сборник под редакцией Авдюшина С.И. и Данилова А.Д. Л-д. :Гидрометеиздат. 1987.
4. Искусственный интеллект. Википедия, 2020.

APPLIED GEOPHYSICS OF THE IONOSPHERE AND THE ACTUAL APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGY

Kalinin Yu. K., Repin A. Yu., Khotenko E. N.

The semantic relationship between various sections of applied ionospheric geophysics and technologies that are related to the so-called artificial intelligence is considered. It is proposed to consider two branches in ionospheric geophysics: fundamental and applied. Technical ionospheric geophysics is distinguished from applied branch. Among the technologies of artificial intelligence options in which it is possible to create computer programs with access to the consumer are considered. In this case consumers are either an operator or an autonomous device.

KEYWORDS: ARTIFICIAL INTELLIGENCE, IONOSPHERIC SERVICE, LONG-TERM FORECAST, MAXIMUM APPLICABLE FREQUENCY