

Солнечная энергия: анализ среднегодовых значений, тренды, графики, закономерности

Введение по солнечной энергии

В главе представлен анализ собранных данных по солнечным электростанциям (СЭС) для восьмидесяти пяти регионов России за период с 1980 по 2020 годы, а также наиболее значимые изменения за 40 лет. Для каждого региона было рассчитано среднее значение КИУМ по трем точкам внутри административных границ региона, расположенным равноудаленно друг от друга, в максимально возможной степени.

В данном исследовании использовались спутники MERRA, которые обладают несколькими преимуществами по сравнению с другими спутниками, собирающими климатические данные. Они предоставляют наблюдения с интервалом в 1 час и имеют пространственное разрешение $1/2^\circ$ широты и $2/3^\circ$ долготы, что соответствует примерно 50×50 км по Европе.

Для моделирования выходной мощности фотоэлектрических систем использовалась модель Global Solar Energy Estimator (GSEE). При расчете КИУМ модель использует три показателя: прямое излучение, диффузное излучение и температуру.

Расчет КИУМ СЭС происходит следующим образом. Во-первых, значения линейно интерполируются из ячеек сетки MERRA в заданные координаты. Затем спутник оценивает долю диффузного излучения с помощью модели BRL (Boland Ridley Lauret), которая показала лучшие результаты среди множества подобных моделей. Модель BRL требует индекса ясности, который оценивается на основе данных MERRA. SARAH (Solar Radiation Heliosat) предоставляет как прямое, так и общее освещение. Затем вычисляется освещенность на плоскости фотоэлектрической панели.

Модель также способна моделировать системы слежения с одной или двумя осями (наклон и азимут).

В данном исследовании данные были собраны для установок с двухосным отслеживанием солнца, поскольку значительная часть СЭС может быть интегрирована в энергосистему России в долгосрочной перспективе, когда большинство установок, вероятно, будут оснащены двухосным отслеживанием.

Выходная мощность панели рассчитывается на основе освещенности в плоскости, определенной на предыдущих этапах. Это делается с использованием модели относительной производительности СЭС, которая предоставляет кривые эффективности панели в зависимости от температуры. Температура панели оценивается на основе температуры окружающей среды с учетом влияния освещенности.

В первой части исследования представлены среднегодовые значения КИУМ с 1980 по 2020 год для каждого субъекта РФ. Эти данные позволяют

оценить эффективность использования мощностей в каждом регионе в течение указанного периода времени.

Далее, для каждого региона был построен график, на котором отображены все среднегодовые значения КИУМ. Этот график позволяет визуально сравнить эффективность использования мощностей в разных регионах и выявить возможные тенденции.

Также был проведен анализ линии тренда, который позволяет определить рост или снижение среднегодовых показателей КИУМ в долгосрочной перспективе. Это позволяет выявить общие тенденции в изменении эффективности использования мощностей во всех регионах.

Для оценки распределения частоты КИУМ в 1980, 2000 и 2020 годах были построены соответствующие графики.

Дополнительно, были построены графики типа boxplot за 1980, 2000 и 2020 года, отражающие распределения собранных временных рядов. Прямоугольная диаграмма или boxplot — это метод графической демонстрации групп локализации, разброса и асимметрии числовых данных через их квантили.

Таким образом, данное исследование представляет собой комплексный анализ изменения значений коэффициента использования установленной мощности в различных субъектах Российской Федерации, что позволяет выявить общие тенденции и вариативность в использовании мощностей в разных регионах..

ОЭС Юга

Все субъекты в данном регионе показали рост за 40 лет исследований. Несколько субъектов — Чеченская Республика, Республика Ингушетия и Республика Северная Осетия — сильно выделяются на фоне остальных субъектов в стране и показывают почти наибольший прирост по среднему значению КИУМ за 40 лет (рис. 1).

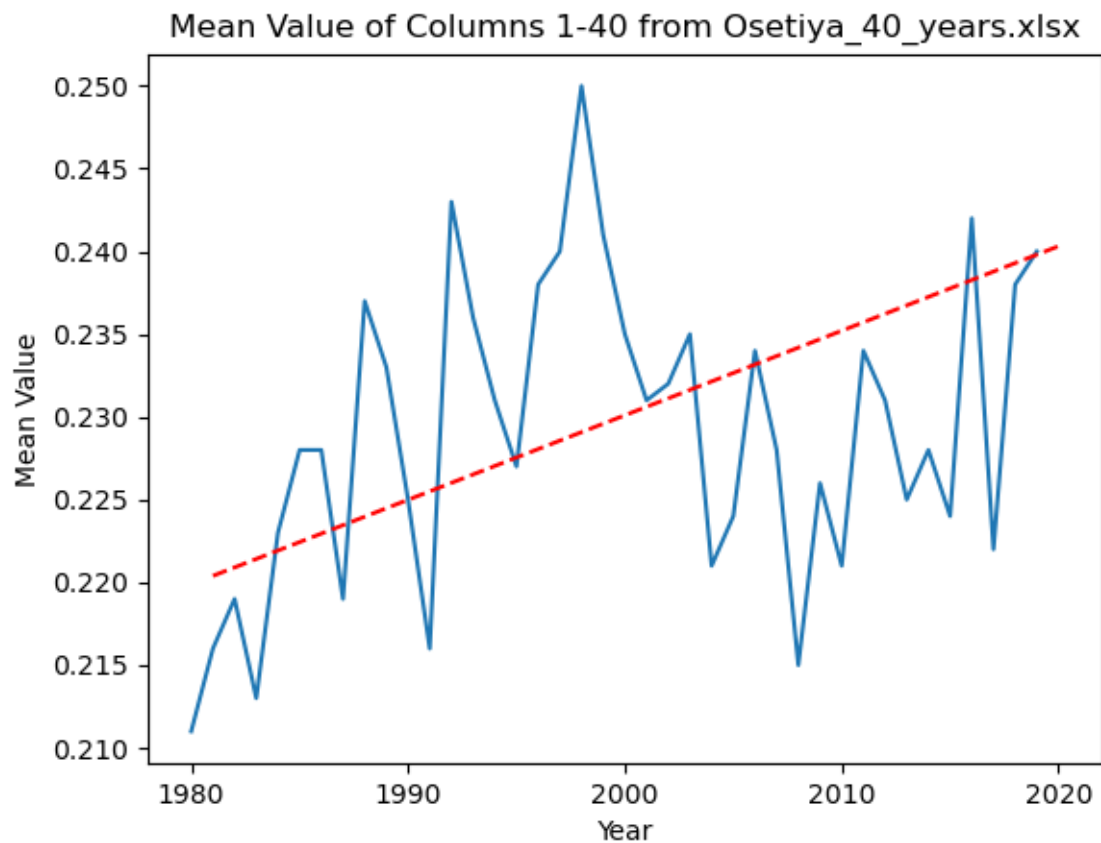


Рисунок 1 – график среднегодовых КИУМ Северной Осетии

При рассмотрении распределения частот — в большинстве субъектов повторяется ситуация с ростом средних-высоких значений за последние 20 лет, при этом на графиках типа Boxplot существенных изменений не выявлено (рис.2).

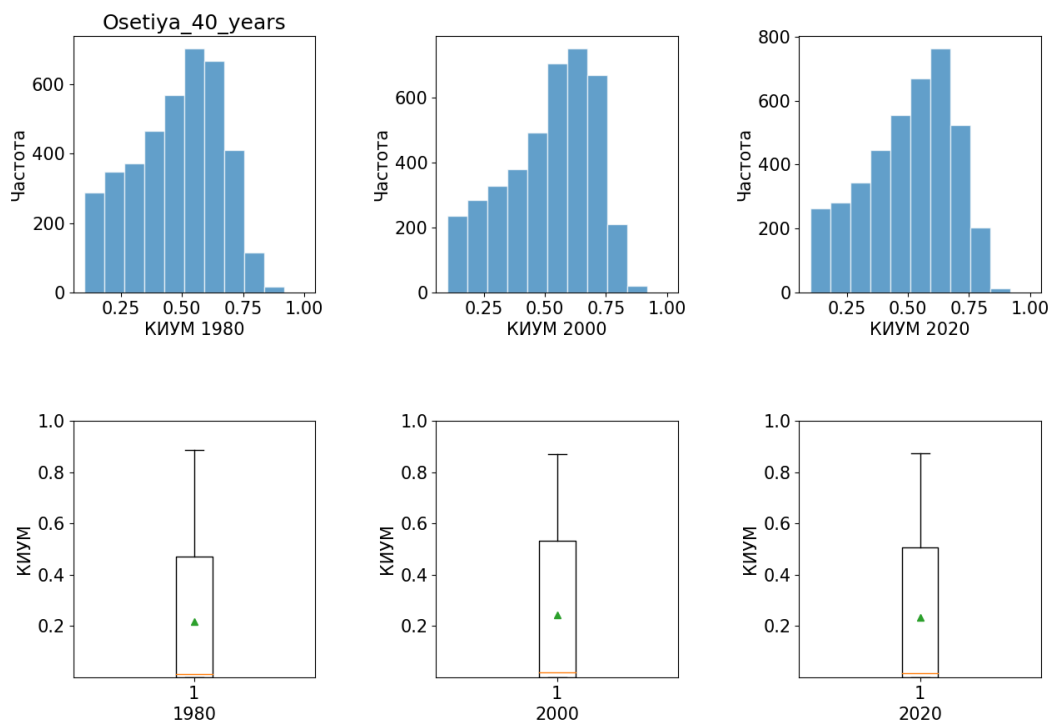


Рисунок 2 — показатели Республики Северная Осетия (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

ОЭС Центра

В рассматриваемом регионе наблюдается интересная географическая закономерность, связанная с изменением среднегодовых показателей в субъектах, расположенных вблизи Среднерусской возвышенности, таких как Смоленская, Московская, Владимирская, Костромская, Ивановская и Тверская области. За последние 40 лет в этих регионах наблюдается либо небольшое снижение, либо небольшой рост указанных показателей. В то же время, в других регионах отмечается значительный рост, причем лидером по этому показателю является Воронежская область, входящая в число десяти наиболее успешных субъектов в целом по росту (рис. 3). Кроме того, для всех рассматриваемых субъектов региона характерно снижение показателей КИУМ в начале 1980-х и в конце 1980-х годов. Отмечается также характерный скачок данного показателя в последнее десятилетие, с последующим спадом, особенно ближе к 2020 году.

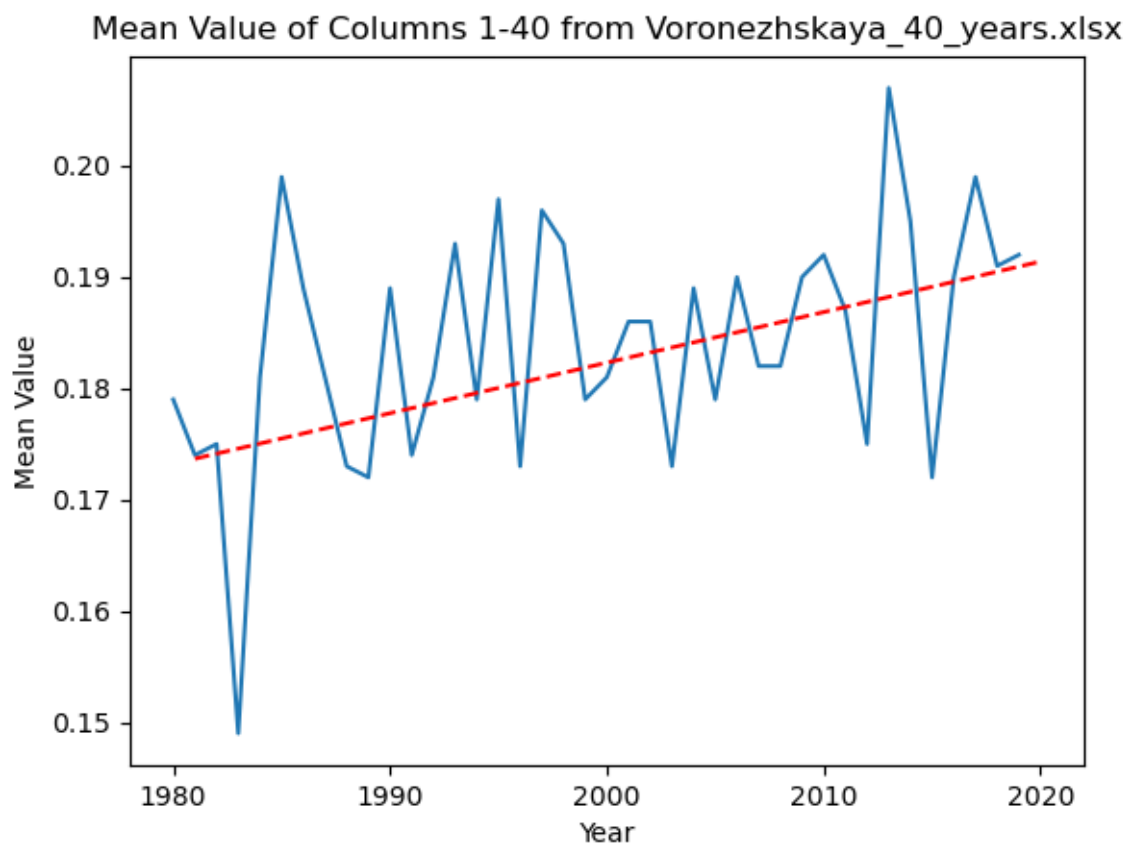


Рисунок 3 – график среднегодовых КИУМ Воронежской области

Что касается распределения частот, то тут тренд похожий с Южным регионом – прослеживается рост средних и высоких значений. На графиках типа Voxplot заметно снижение уровня аномальных высоких значений (рис. 4).

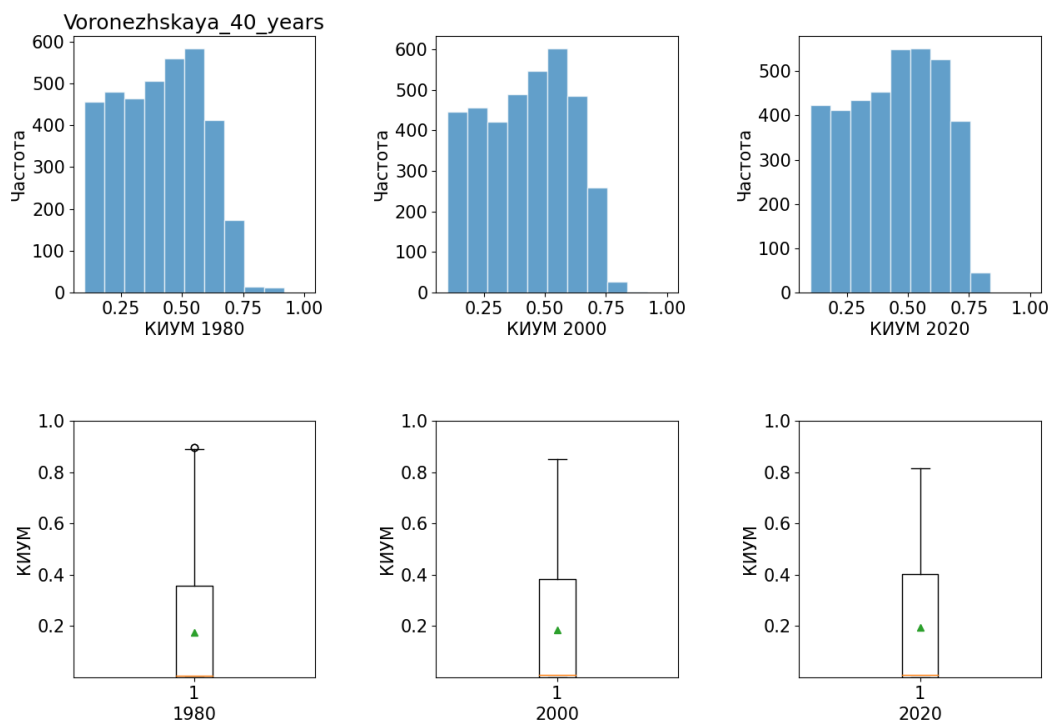


Рисунок 4 — Показатели Воронежской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

ОЭС Северо-запада

Субъекты в данном регионе показали рост по среднегодовым показателям КИУМ. Исключение составляют два субъекта в восточной части энергетической сети — Республика Коми и Ненецкий АО. Калининградская область является лидером среди всех регионов России по росту показателей за 40 лет (рис. 5).

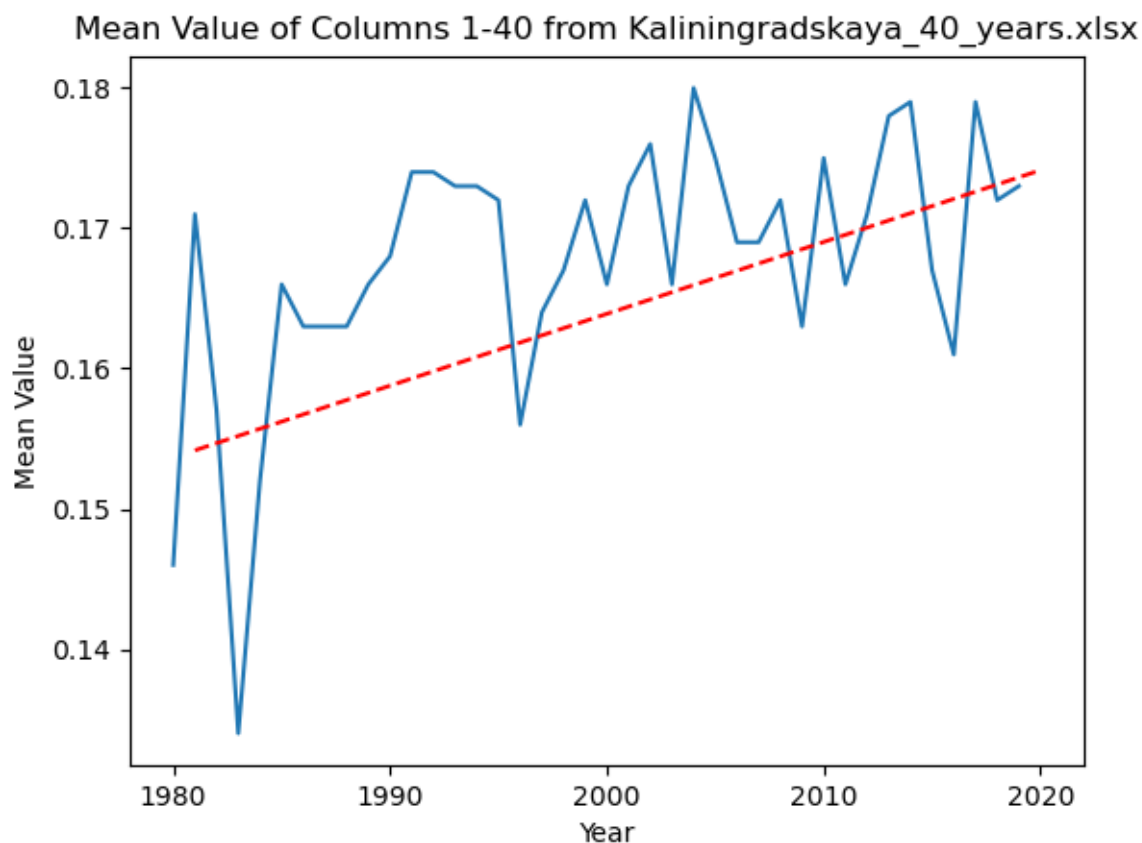


Рисунок 5 – график среднегодовых КИУМ Калининградской области

Что касается распределения частот — за 40 лет прослеживается увеличение высоких значений при незначительном снижении нулевых значений. По графикам Voxplot прослеживается уменьшение аномально высоких значение и увеличение верхнего квантиля (рис. 6).

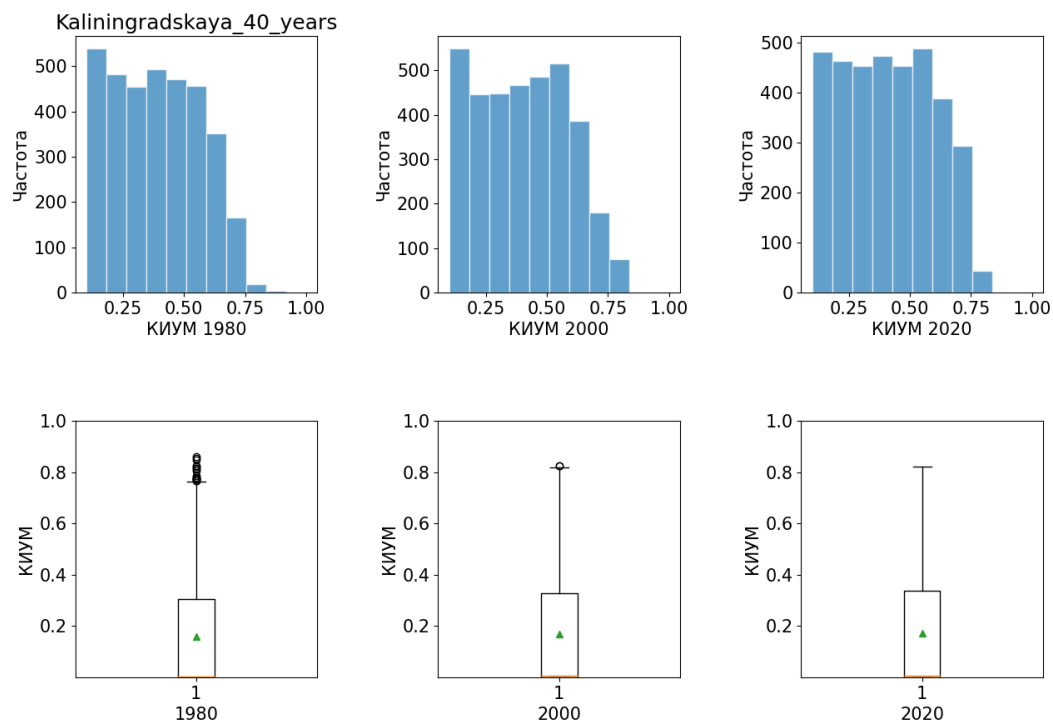


Рисунок 6 — показатели Калининградской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

ОЭС Средней Волги

Все субъекты в данной энергетической сети показали рост и примерно одинаковые графики на протяжении 40 лет. Наибольший рост показала Пензенская область (рис. 7).

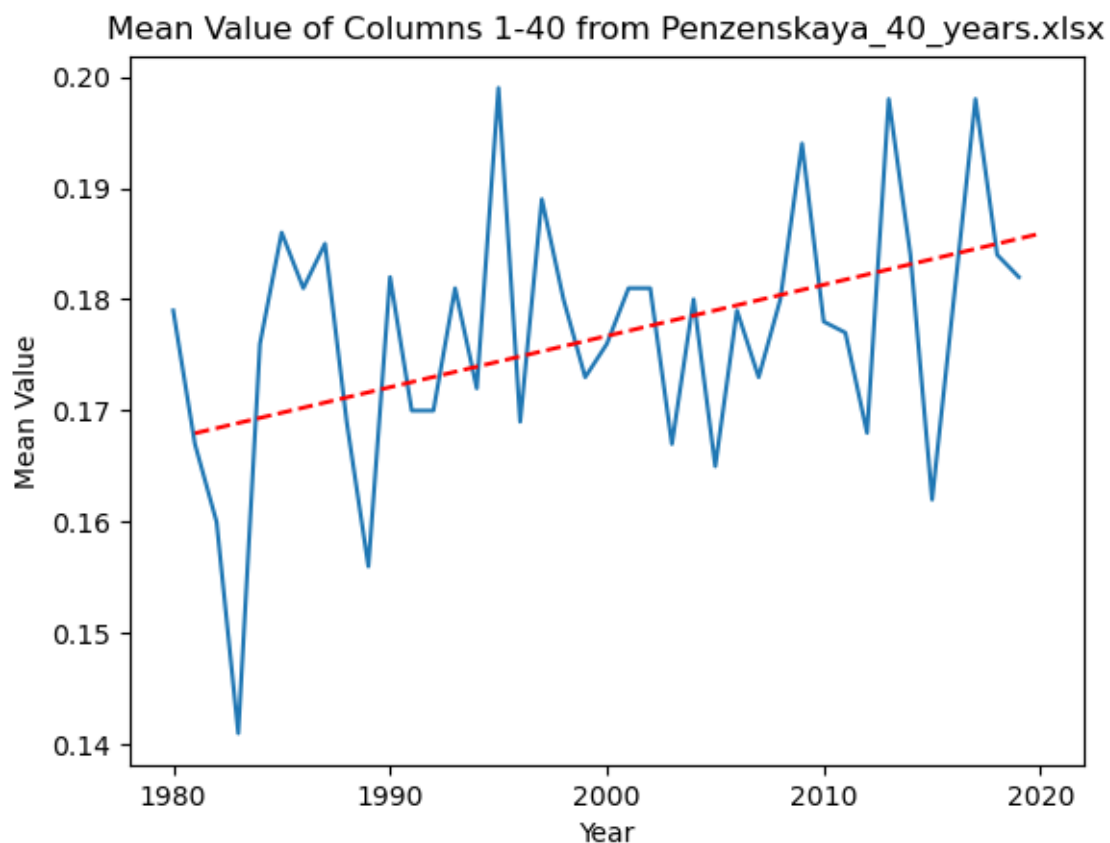


Рисунок 7 – график среднегодовых КИУМ Пензенской области

Распределение частот почасовых КИУМ показывает, что в целом распределение осталось примерно на том же уровне, исключение составил 2000 год — там прослеживалось выравнивание всех значений (кроме высоких) на одном уровне, но к 2020 году показатели вернулись к тем, что были в 1980-м (рис. 8).

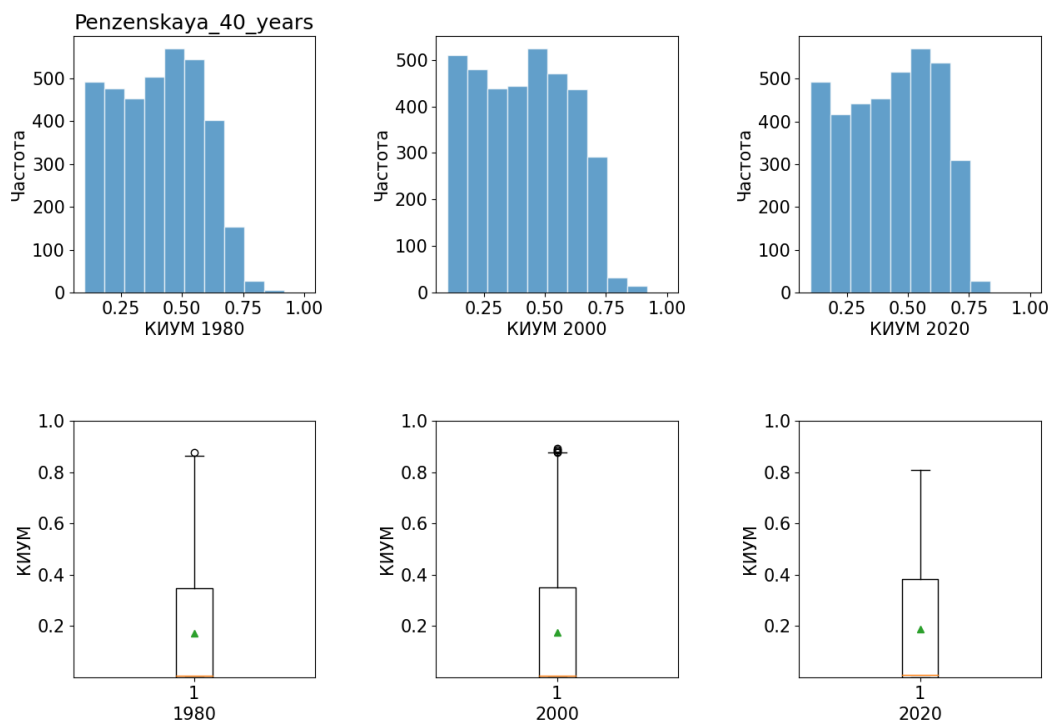


Рисунок 8 — показатели Пензенской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

ОЭС Урала

Большинство субъектов в регионе показали спад по среднегодовым показателям. Исключение составили несколько регионов в южной части ОЭС — Республика Башкортостан, Челябинская и Оренбургская область. При этом ЯНАО занимает первое место в антирейтинге регионов как регион с наибольшим падением среднегодовых показателей за 40 лет (рис. 9).

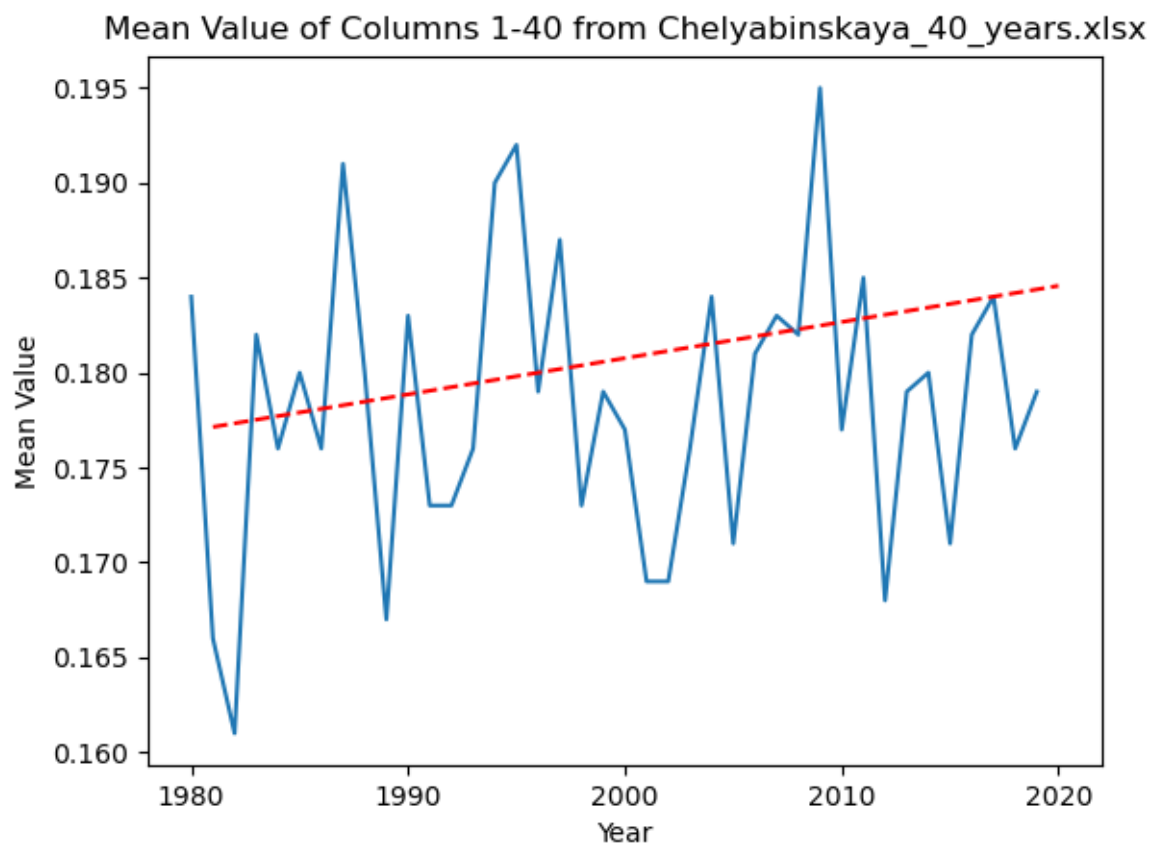


Рисунок 9 – график среднегодовых КИУМ Челябинской области

Распределение показателей осталось примерно на том же уровне, что было 40 лет назад. Графики Voxplot при этом не изменились (рис. 10).

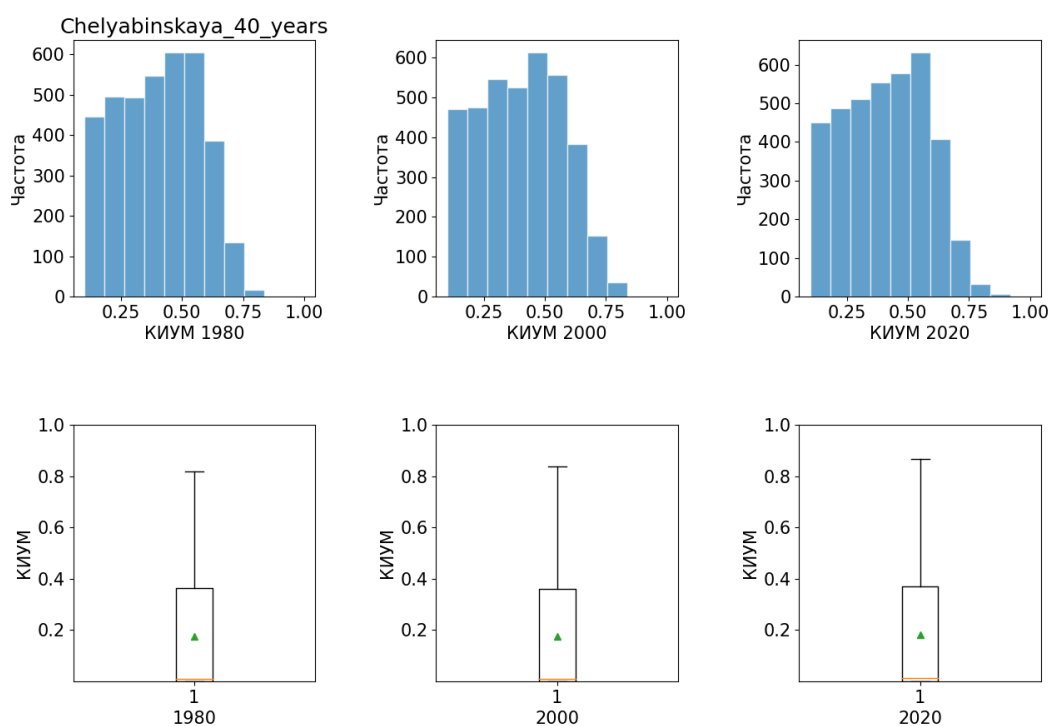


Рисунок 10 — показатели Челябинской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

ОЭС Сибири

Большинство субъектов в регионе продемонстрировали негативную динамику за 40-летний период наблюдений и в целом занимают лидирующие позиции в антирейтинге по снижению показателей. Однако, стоит отметить два исключения - Республика Бурятия и Иркутская область (рис. 11).

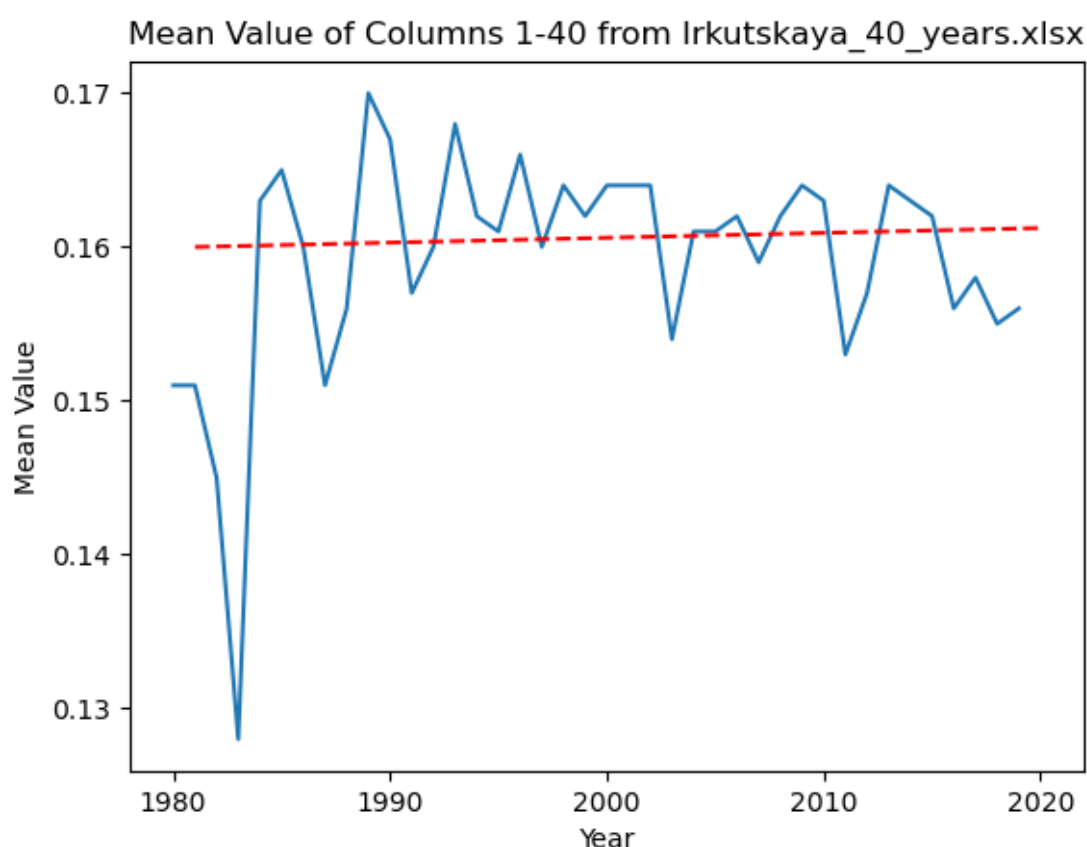


Рисунок 11 – график среднегодовых КИУМ Иркутской области

Распределение почасовых КИУМ в 1980 и 2020 остались идентичными за исключением нескольких небольших изменений. Графики Boxplot не показали существенных отличий за 40 лет наблюдений (рис. 12).

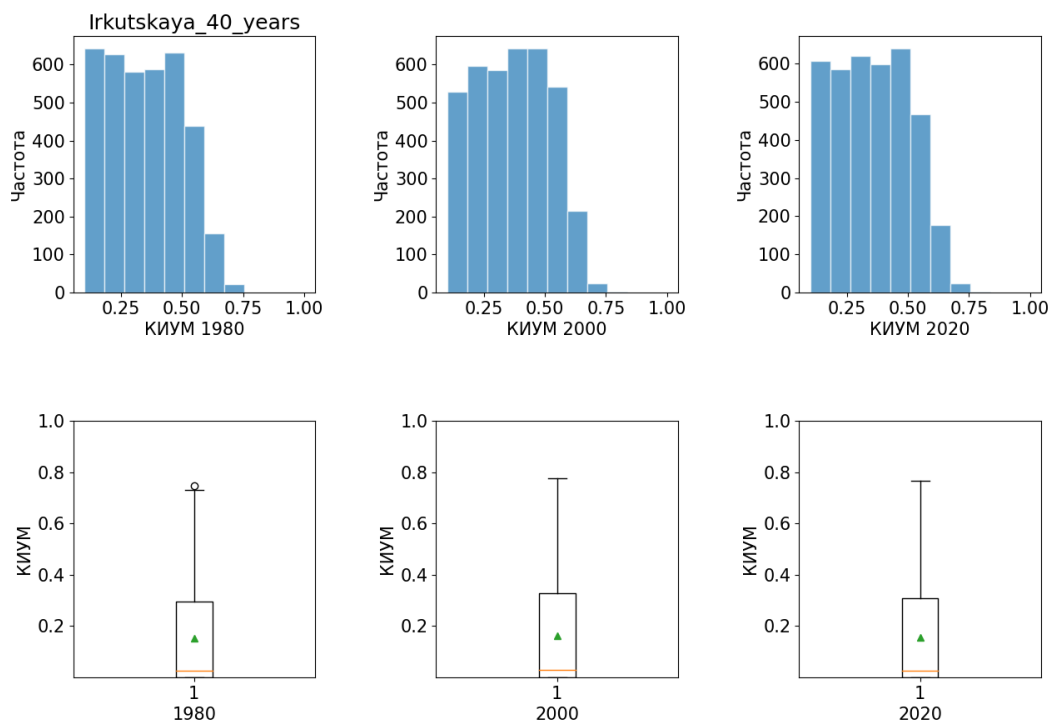


Рисунок 12 — показатели Иркутской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

ОЭС Дальнего Востока

В данном регионе несколько субъектов показали незначительное снижение среднегодовых значений за 40 лет — Амурская область, Еврейская АО и Приморский край. Хабаровский край — единственный субъект, который показал незначительный рост показателей за 40 лет наблюдений (рис. 13).

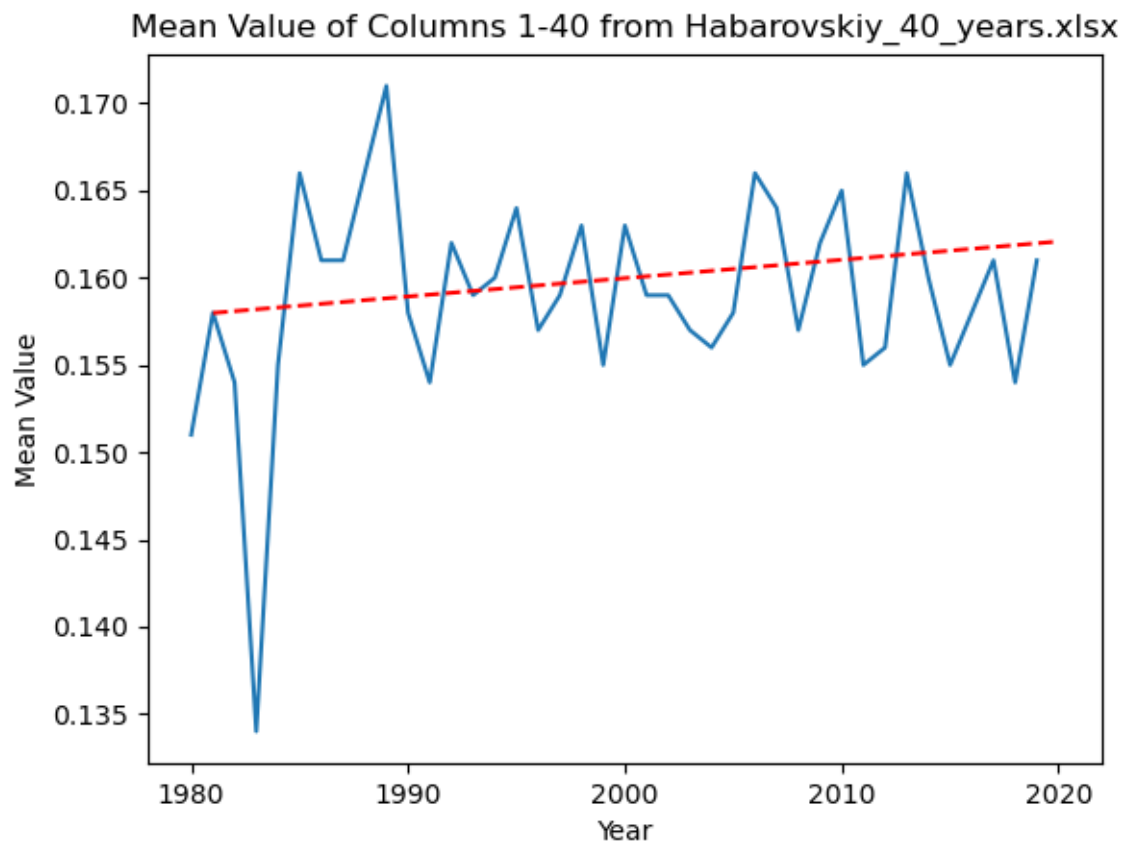


Рисунок 13 – график среднегодовых КИУМ Иркутской области

Распределение почасовых показателей КИУМ очень похоже на другие регионы — схожесть показателей 1980 и 2020 года. Графики Voxplot указывают на идентичные выводы (рис. 14).

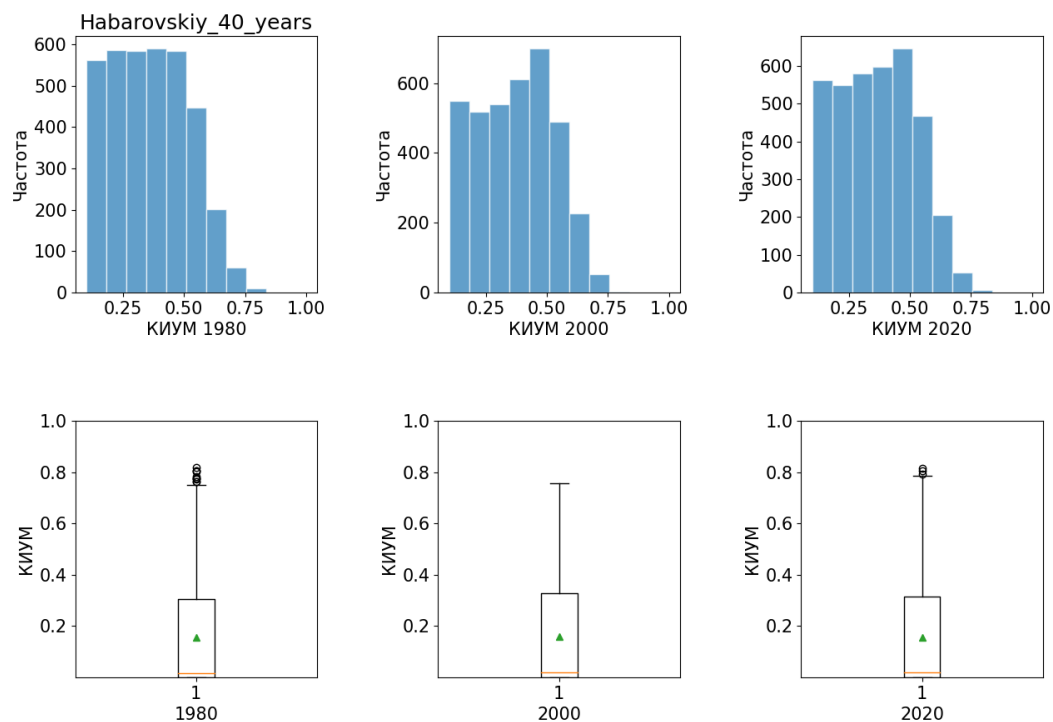


Рисунок 14 — показатели Хабаровском крае (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

Изолированные регионы

4 из 5 изолированных регионов показали спад показателей: Чукотский автономный округ, Камчатский край, Сахалинская область и Якутия. Лишь Магаданская область показала возрастающий тренд (рис. 15).

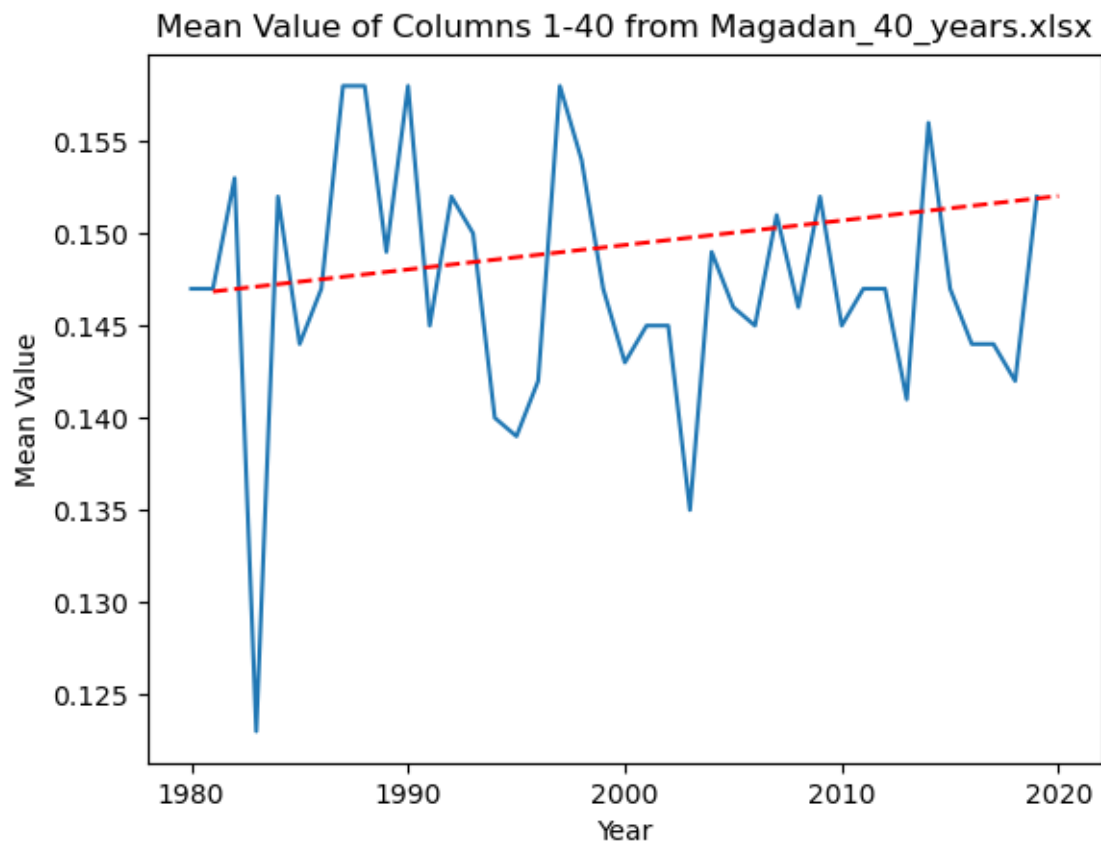


Рисунок 15 – график среднегодовых КИУМ Магаданской области

По распределению почасовых показателей КИУМ изолированные регионы повторяют модель поведения близлежащих регионов — отсутствие различий между показателями 1980 и 2020 года при изменении показателей в 2000 году (рис. 16).

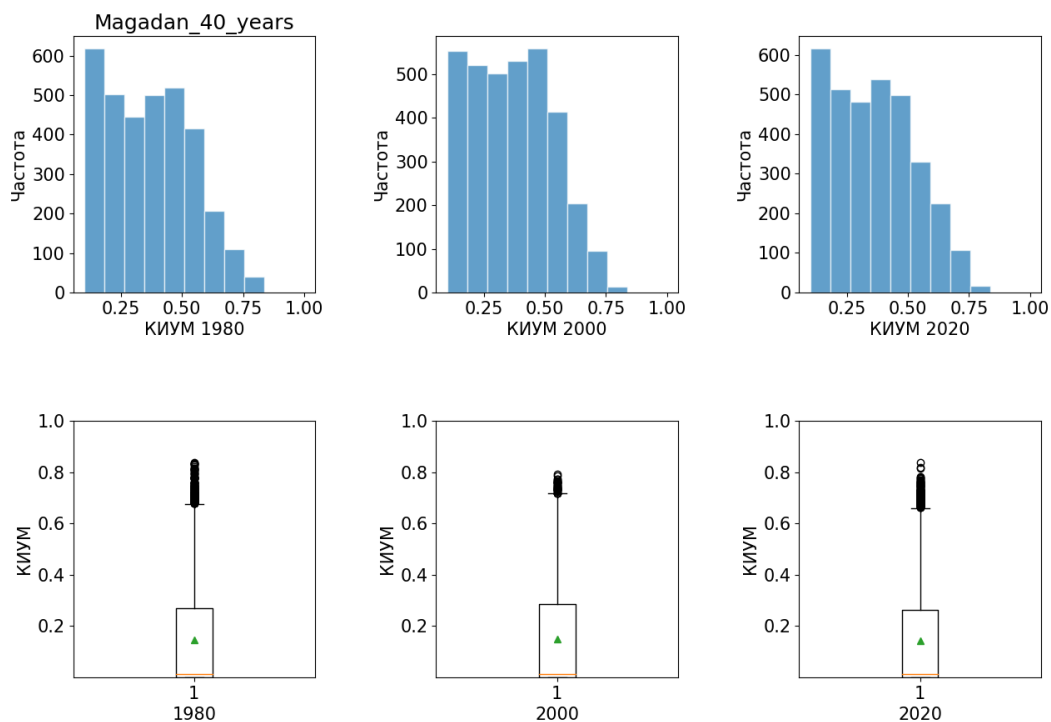


Рисунок 16 — показатели Магаданской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

Сопоставление регионов

На основе проведенного анализа по данным КИУМ были составлены несколько таблиц с разными показателями — 20 лучших субъектов по среднему значению КИУМ и диапазону трендов КИУМ (табл.1, 2).

Таблица 1 – список регионов с наибольшими средними значениями КИУМ за год

Название региона	Среднее значение КИУМ за 2020 г.
Республика Кабардино-Балкария	0.250
Республика Карачаево-Черкессия	0.244
Республика Северная Осетия	0.237
Республика Тыва	0.235
Республика Ингушетия	0.232
Севастополь	0.231
Республика Алтай	0.230
Чеченская Республика	0.228
Республика Дагестан	0.227
Республика Крым	0.226
Краснодарский край	0.214
Республика Адыгея	0.214

Республика Бурятия	0.209
Ставропольский край	0.209
Забайкальский край	0.206
Астраханская область	0.206
Республика Калмыкия	0.205
Ростовская область	0.203
Волгоградская область	0.202
Приморский край	0.199

Таблица 2 — регионы с наибольшим показателем восходящего тренда (по среднегодовым показателям КИУМ)

Название региона	Величина возрастания тренда
Калининградская область	0.020
Республика Северная Осетия	0.019
Республика Ингушетия	0.019
Чеченская Республика	0.018
Пензенская область	0.018
Воронежская область	0.018
Ульяновская область	0.017
Саратовская область	0.017
Санкт-Петербург	0.017
Белгородская область	0.016
Республика Карачаево-Черкессия	0.016
Тамбовская область	0.016
Республика Кабардино-Балкария	0.016
Липецкая область	0.015
Республика Дагестан	0.014
Республика Мордовия	0.014
Волгоградская область	0.014
Ленинградская область	0.014
Севастополь	0.013
Оренбургская область	0.013

Курсивом выделены те регионы, которые присутствуют во всех таблицах. Можно составить еще одну таблицу со всеми сводными данными:

Таблица 3 — Сводная таблица из регионов, присутствующих во всех таблицах

Название региона	Среднее значение КИУМ за 2020 г.	Величина возрастания тренда
Республика Кабардино-Балкария	0.250	0.016

Республика Карачаево-Черкессия	0.243	0.016
Республика Северная Осетия	0.237	0.020
Республика Ингушетия	0.232	0.019
Севастополь	0.231	0.013
Чеченская Республика	0.228	0.018
Республика Дагестан	0.227	0.014
Волгоградская область	0.202	0.014

Таким образом, представленные данные свидетельствуют о наиболее стабильном и продолжительном росте в указанных регионах, что делает их потенциально наиболее выгодными для развития солнечной энергетики в будущем. Географические закономерности, выявленные в данном исследовании, указывают на то, что все регионы из представленной таблицы находятся в одной общей энергетической системе — ОЭС Юга, что позволяет сделать вывод о том, что данная ОЭС является наиболее выгодной для развития солнечной энергетики.

Вывод по солнечной энергии

В общем, в большинстве регионов ОЭС в европейской части России наблюдается увеличение среднегодовых значений КИУМ за последние 40 лет, что может быть обусловлено климатическими изменениями, охватившими мир в последние десятилетия. Однако регионы, расположенные за Уралом и на Дальнем Востоке, показывают негативный тренд, что может быть вызвано климатическими изменениями.

Наиболее перспективными регионами для развития ветровой энергетики являются восемь регионов — и все они расположены в южной части России. В этих регионах сочетается наибольший прирост среднегодовых значений КИУМ и высокий уровень КИУМ по сравнению с другими регионами.

Ветровая энергия: анализ среднегодовых значений, тренды, графики, закономерности

Введение

В данной главе представлен анализ собранных данных по ветряным электростанциям (ВЭС) для восьмидесяти пяти регионов России за период с 1980 по 2020 годы, а также наиболее значимые изменения за 40 лет.

За последнее десятилетие ветроэнергетика (наземная и морская) стала важной темой исследований в области энергетики. В настоящее время ветроэлектростанции (ВЭС) составляют значительную долю мирового производства электроэнергии, примерно 6,6% в 2021 году. Для моделирования работы ВЭС в нерегулируемом режиме, который зависит от погоды и не связан

с экономическими или рыночными факторами, разработчикам энергетических систем требуются внешние данные. Особенно важны временные ряды с высоким разрешением выходной мощности для крупных ветропарков, так как их изменчивый и непредсказуемый характер создает сложности для электроэнергетических систем.

Для расчета выходной мощности ВЭС используется модель Virtual Wind Farm (VWF). В качестве типовой установки ВЭС используется Simens Gamesa sg 4.5. Основным алгоритмом моделирования глобальных климатических данных, таких как скорость ветра, называется реанализ. Реанализ становится все более популярным в исследованиях возобновляемых источников энергии из-за своей удобности и глобального охвата. Однако использование реанализа для синтеза выходной мощности ВЭС требует тщательной проверки. В сообществе исследователей ВЭС преобладает подход использования моделей уменьшенного масштаба и более подробных данных о местности. Коммерческие инструменты, такие как WaSP, Virtual Met Masts, 3TIER и Vortex, широко используются в сообществе ветроэнергетики из-за их высокой точности, которая достигается за счет увеличения вычислительных ресурсов и требований к данным.

Для сбора данных, необходимых для расчетов, была разработана автоматизированная система на основе языка программирования Python и библиотек Pandas и Selenium. Pandas используется для анализа и обработки данных, а Selenium - для автоматизации взаимодействия с веб-интерфейсами. Разработанная система собирает данные по заданным точкам, а последующая обработка данных позволяет получить усредненные показатели для региона или более крупной энергосистемы.

В ходе исследования рассматриваются следующие ключевые значения:

- 1) Среднегодовые значения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) с 1980 по 2020 год для каждого субъекта РФ. Данные значения позволяют оценить эффективность использования мощностей в каждом регионе в течение указанного периода времени.

- 2) Для каждого региона строится график, на котором отображены все среднегодовые значения КИУМ. Этот график позволяет визуально сравнить эффективность использования мощностей в разных регионах и выявить возможные тенденции.

- 3) Также проводится анализ линии тренда, который позволяет определить рост или снижение среднегодовых показателей КИУМ в долгосрочной перспективе. Это позволяет выявить общие тенденции в изменении эффективности использования мощностей во всех регионах.

- 4) Распределение частоты КИУМ ВЭС в 1980, 2000 и 2020 годах.

- 5) Графики типа boxplot за 1980, 2000 и 2020 года, отражающие распределения собранных временных рядов. Прямоугольная диаграмма или boxplot — это метод графической демонстрации групп локализации, разброса и асимметрии числовых данных через их квантили. В дополнение к прямоугольнику на прямоугольном графике могут быть линии (которые называются усами), отходящие от прямоугольника, указывающие на

изменчивость за пределами верхнего и нижнего квантилей. Выбросы, которые значительно отличаются от остальной части набора данных, могут быть нанесены в виде отдельных точек за пределами усов на прямоугольном графике. Прямоугольные графики являются непараметрическими: они отображают вариации в выборках статистической совокупности без каких-либо предположений о лежащем в основе статистическом распределении. Интервалы в каждом подразделе диаграммы-прямоугольника указывают на степень дисперсии (разброса) и асимметрии данных.

Кроме этого, были произведены расчеты для определения часов, когда потребление в регионе достигает максимума. На основе полученных часов был проведен анализ КИУМ ВЭС в регионах для нахождения минимальной гарантированной выработки.

Таким образом, данное исследование представляет собой комплексный анализ изменения значений коэффициента использования установленной мощности в различных субъектах Российской Федерации, что позволяет выявить общие тенденции и вариативность в использовании мощностей в разных регионах.

ОЭС Юга

В большинстве субъектов наблюдается рост среднегодовых значений КИУМ за последние 40 лет, за исключением Ингушетии, расположенной в южной части ОЭС. Отмечается, что регионы, прилегающие к Ингушетии, демонстрируют незначительный рост, который соответствует горизонтальному тренду. Большинство субъектов в данном регионе имеют наименьшие значения КИУМ среди всех субъектов РФ. Например, Ингушетия занимает последнее место по диапазонам значений КИУМ за 40 лет наблюдений. Кроме того, Калмыкия, Астраханская область и Ставропольский край показывают наибольшие трендовые значения КИУМ среди всех остальных субъектов России (рис. 1).

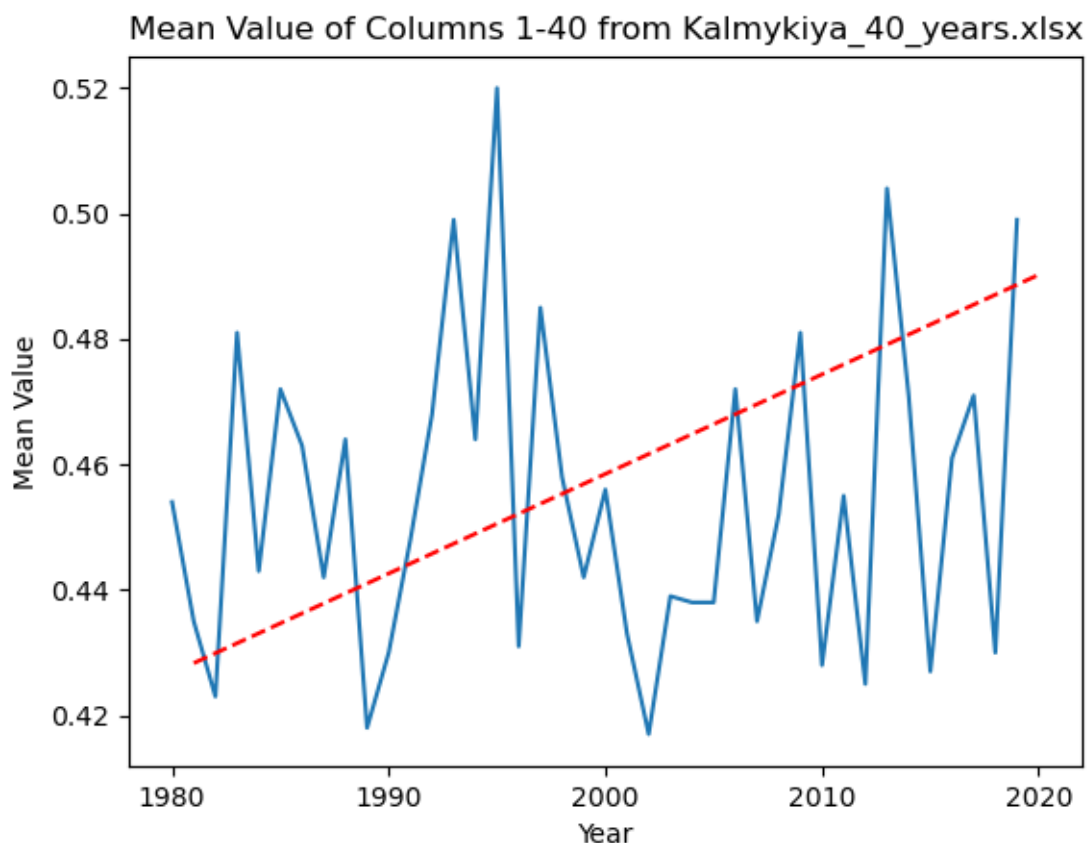


Рисунок 1 — график среднегодовых КИУМ и тренд по Республике Калмыкия

В регионах, находящихся у подножья Кавказских гор, за 40 лет не выявлено существенных изменений, например, показатели Чечни и Дагестана на прежнем уровне при незначительном изменении частоты в сторону более высоких показателей. Изменение на графиках Voxplot показывает, что нижняя граница данных достигла нулевой отметки при повышении единичных выбросов на высоких частотах, что означает о наличии околонулевых выбросов в 2018-2020 годы, а также участвовавшие случаи аномально высоких значений, не свойственных для данного региона (рис. 2).

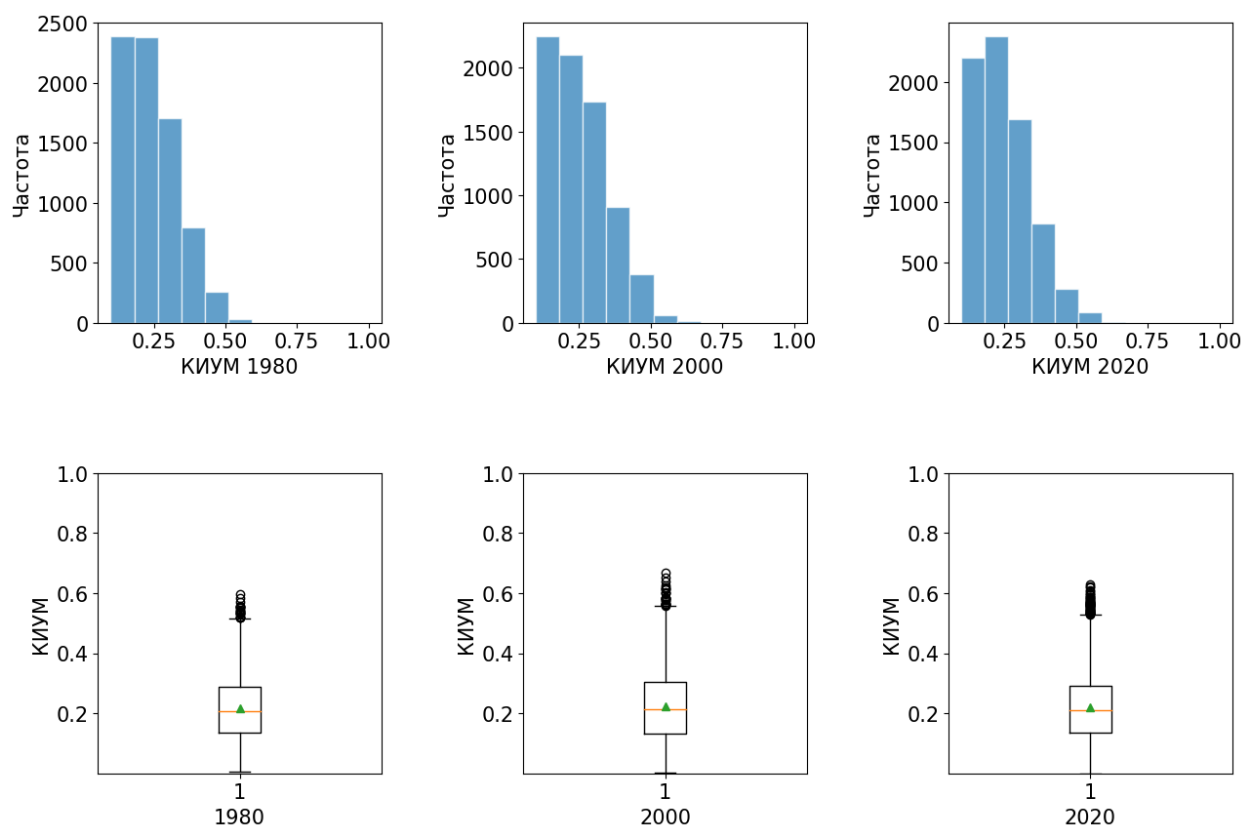


Рис. 2 – Показатели Республики Чечня (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

Куда более серьезные изменения в Крыму и Севастополе, где за 40 лет показатели КИУМ становятся более похожими на показатели остальных регионов Юга. Графики Boxplot подтверждают данный вывод, при этом свои особенности у региона присутствуют – за 2000 год не обнаружено anomalно высоких данных, а за 2020 год anomalно высокие частоты сосредоточены на небольшом отрезке (в отличии от графика за 1980 год) (рис. 3).

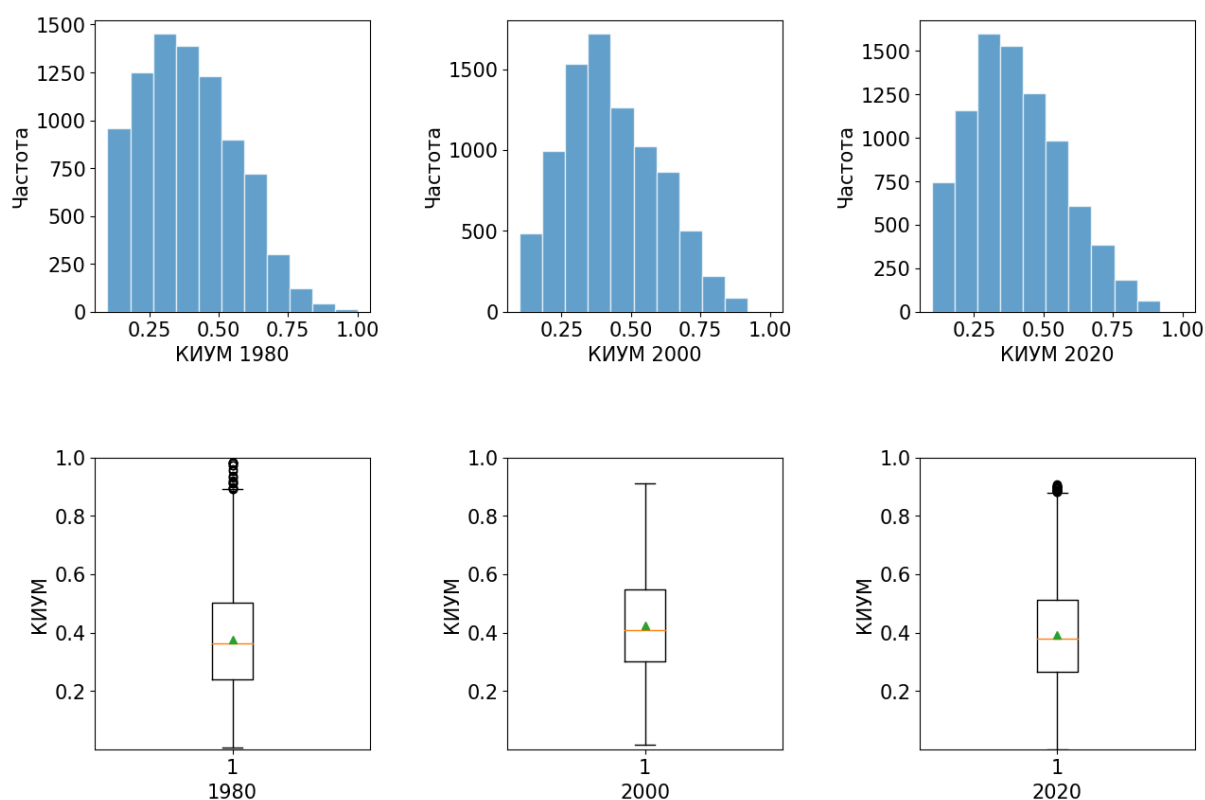


Рис. 3 – Показатели Республики Крым (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

Заметны изменения в Ростовской области — увеличилась частота средних показателей, при этом уменьшилась частотность низких показателей. Схожая ситуация наблюдается в Волгоградской области. На графиках Boxplot наблюдается тенденция на увеличение аномальных значений как выше графика, так и ниже его. Вероятнее всего, в дальнейшем разброс квантилей на графике увеличится (рис. 4).

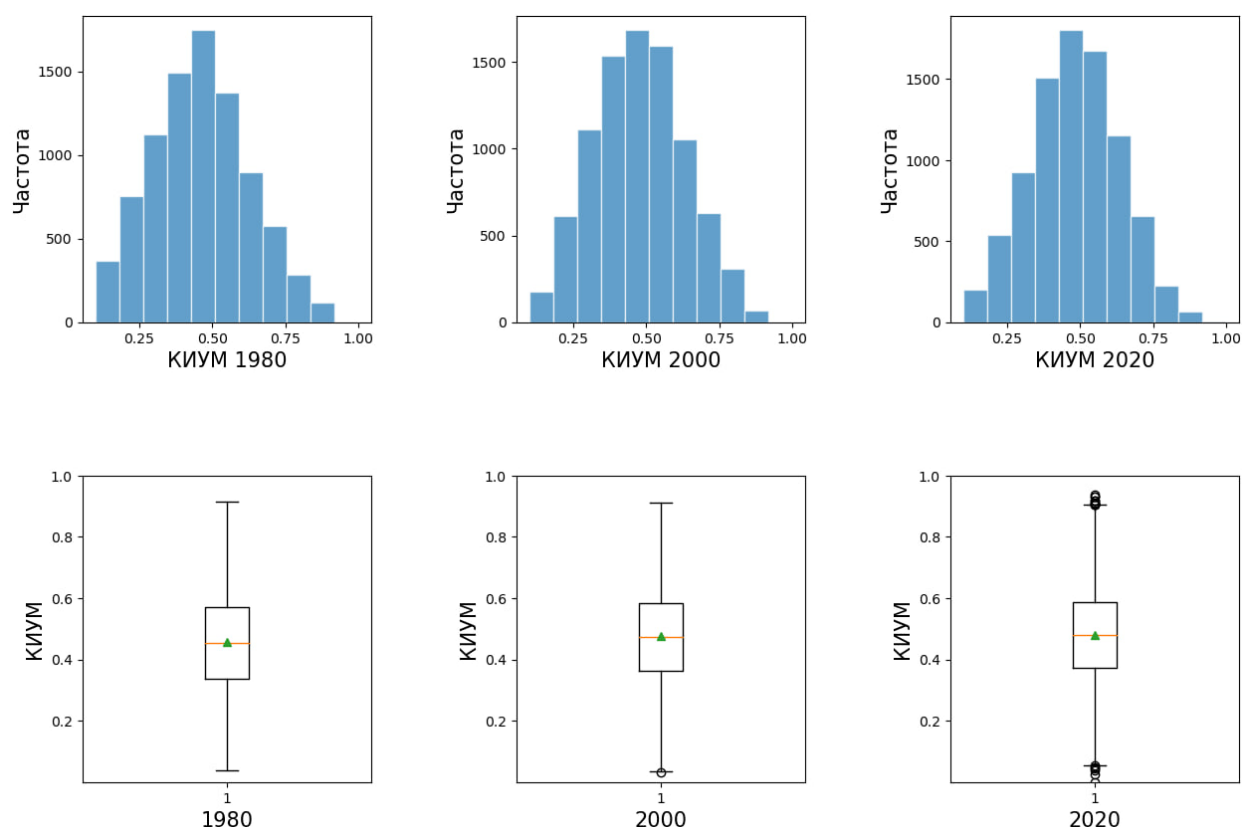


Рис. 4 – показатели Ростовской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

В целом, в регионе не выявлено сильных изменений за 40 лет. В те часы, когда наблюдается максимальное потребление энергии, все субъекты в регионе могут производить минимальную гарантированную выработку (в долях от установленной мощности) с помощью ветряных станций (табл. 1).

Таблица 1 – минимальная гарантированная выработка в часы максимальной нагрузки ОЭС Юга (по регионам)

Регион	1980	2000	2020
Волгоградская область	0.199	0.066	0.152
Республика Адыгея	0.051	0.001	0.131
Ставропольский край	0.067	0.000	0.115
Краснодарский Край	0.033	0.003	0.100
Астраханская область	0.116	0.071	0.078
Севастополь	0.027	0.014	0.024
Чеченская Республика	0.008	0.009	0.020
Республика Кабардино-Балкария	0.001	0.000	0.009
Республика Ингушетия	0.002	0.001	0.005
Республика Калмыкия	0.073	0.094	0.168
Республика Дагестан	0.018	0.025	0.038
Ростовская область	0.213	0.230	0.17
Республика Крым	0.024	0.019	0.08

Республика Карачаево-Черкессия	0.007	0.001	0.006
Республика Северная Осетия	0.001	0.001	0.002

ОЭС Центра

В Центральном регионе наблюдается долгосрочный рост во всех его субъектах. Однако, соседние регионы, такие как Тверская область, Вологодская область и Ярославская область, демонстрируют наименьший уровень роста. С другой стороны, Москва, Московская область и Владимирская область проявляют наибольшую устойчивость в своем росте (рис.5).

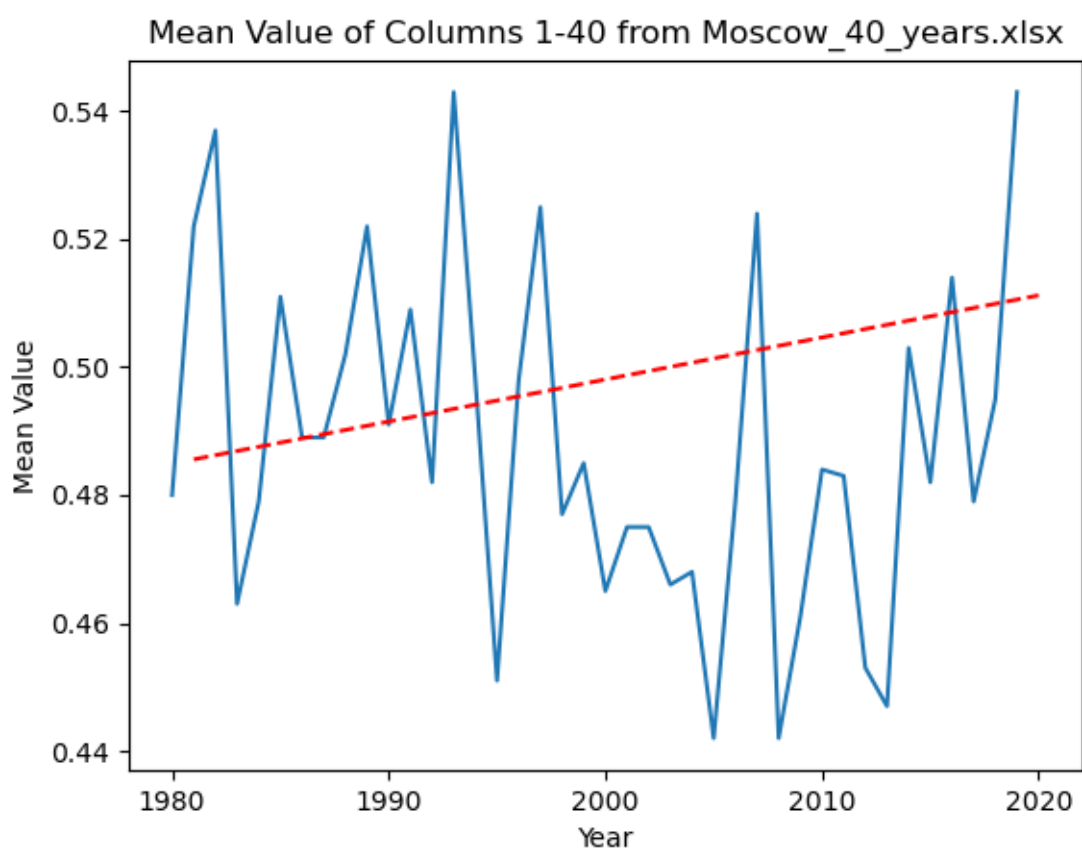


Рисунок 5 — график среднегодовых КИУМ и тренд по Москве (городу фед. значения)

В центральной части России произошли существенные изменения по частоте во многих регионах, в первую очередь связанных с увеличением частоты средних показателей. Например, в Белгородской области существенно увеличилась частота средних показателей, в Брянской области увеличились те же показатели, а также увеличилась частота высоких показателей за счет уменьшения частоты низких показателей. При этом на графиках Voxplot за 40 лет меняется поведение аномальных значений – в графике за 2020 год

аномальных точек ниже графика стало больше, что означает об учащении случаев безветренной погоды (рис. 6).

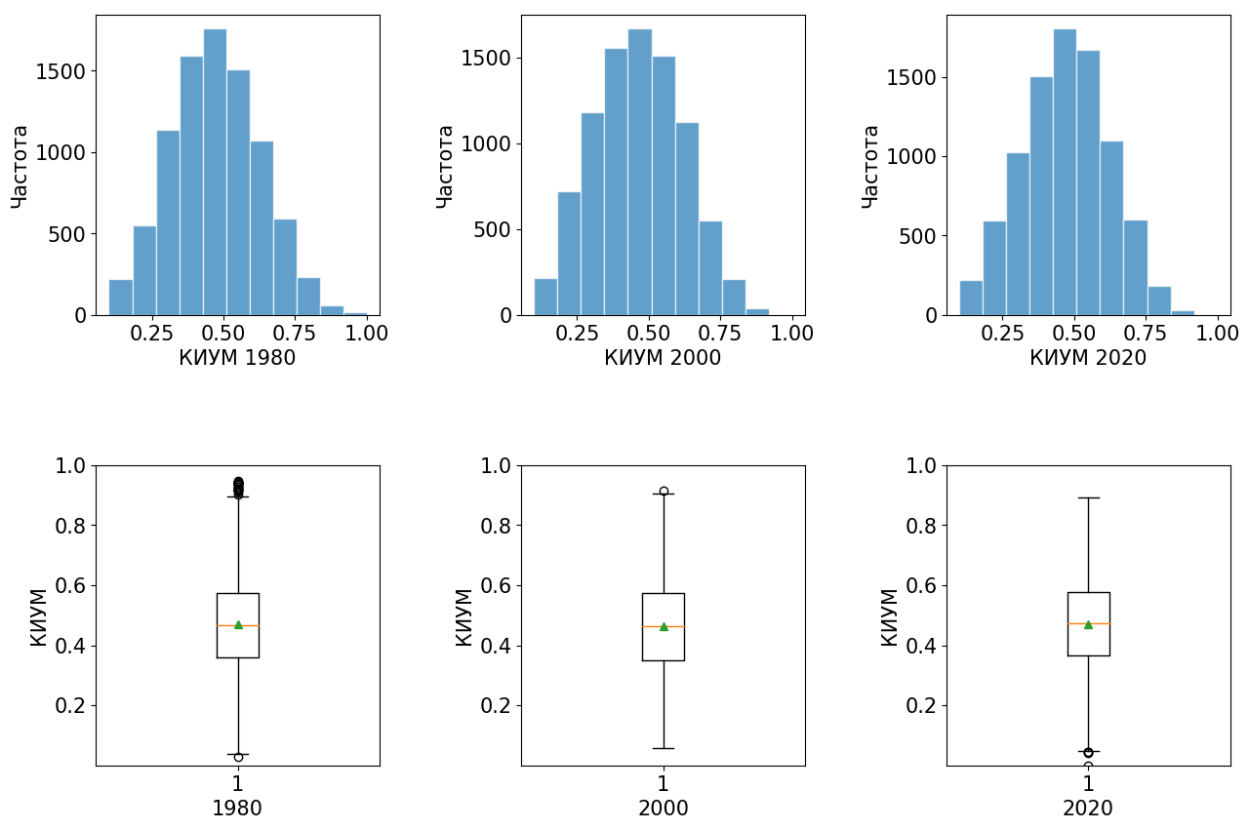


Рис. 6 – показатели Белгородской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

В Орловской, Тульской, Тамбовской, Воронежской областях заметно увеличилась частота показателей с 0,6 до 0,9, при этом показатели с 0,2 до 0,4 везде существенно уменьшились. При движении на восток значения тоже меняются — во Владимирской, Рязанской, Ивановской, Ярославской, Московской областях (а также городе Москве) наблюдается увеличение частоты средних высоких показателей. В часы максимальной нагрузки нулевые значения в ветряной энергетике в регионах не наблюдались (табл. 2).

Таблица 2 – минимальная гарантированная выработка в часы максимальной нагрузки ОЭС Центра (по регионам)

Регион	1980	2000	2020
Белгородская область	0.074	0.022	0.206
Тульская область	0.173	0.032	0.057
Владимирская область	0.135	0.074	0.050
Брянская область	0.096	0.018	0.044
Костромская область	0.036	0.061	0.044
Воронежская область	0.107	0.03	0.042
Липецкая область	0.222	0.002	0.028

Ярославская область	0.123	0.101	0.023
Орловская область	0.135	0.003	0.021
Ивановская область	0.066	0.051	0.011
Курская область	0.079	0.004	0.009
Тверская область	0.107	0.057	0.008
Москва	0.020	0.037	0.006
Волгоградская область	0.063	0.094	0.063
Московская область	0.105	0.015	0.045
Рязанская область	0.211	0.024	0.033
Калужская область	0.123	0.040	0.026
Смоленская область	0.111	0.056	0.06
Тамбовская область	0.176	0.004	0.04

ОЭС Северо-запад

Все субъекты Северо-Западного региона России проявили устойчивый долгосрочный рост значений КИУМ. Однако Калининградская область, являющаяся анклавом и не имеющая общей границы с остальными субъектами региона, оказалась исключением из этой тенденции. В то же время, Республика Коми продемонстрировала наибольший восходящий тренд среди всех субъектов региона (рис. 7).

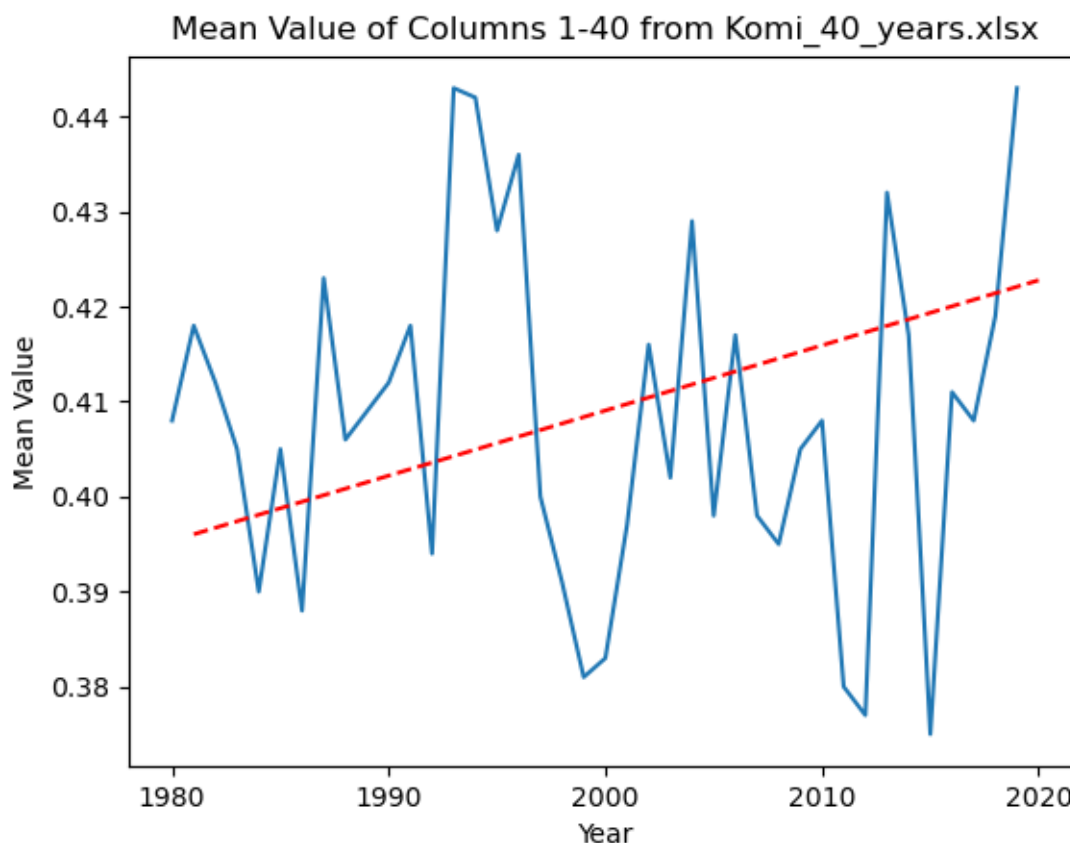


Рисунок 7 — график среднегодовых КИУМ и тренд по Республике Коми

Регионы Севера частично повторяют тренд Центра — например, в СПб и области наблюдается рост частоты высоких и средних значений при сокращении частоты низких значений КИУМ. По графикам Voxplot отличия более заметны — увеличилась длина квантилей на графике, при этом остались аномальные точки как выше графика, так и ниже его на околонулевых значениях (рис. 8).

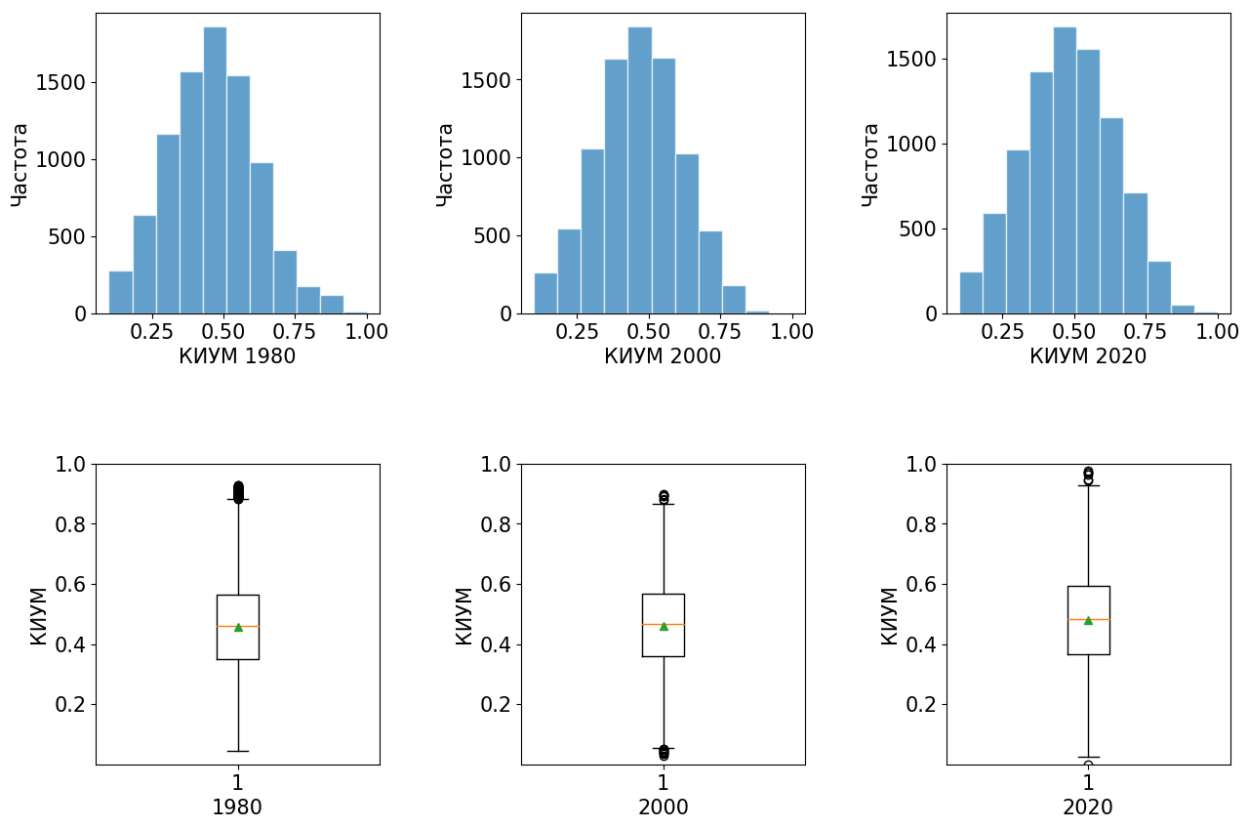


Рис. 8 — показатели Санкт-Петербурга (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

В часы максимальной нагрузки минимальная гарантированная выработка с помощью ветровой энергетики в регионе начинается от 0,02 в Новгородской области (табл. 3).

Таблица 3 — минимальная гарантированная выработка в часы максимальной нагрузки ОЭС Северо-Запада (по регионам)

Регион	1980	2000	2020
Ленинградская область	0.024	0.118	0.210
Санкт-Петербург	0.092	0.137	0.200
Республика Карелия	0.069	0.132	0.157
Мурманская область	0.115	0.292	0.145
Архангельская область	0.084	0.172	0.110

Псковская область	0.016	0.203	0.076
Республика Коми	0.054	0.247	0.062
Новгородская область	0.005	0.046	0.021
Калининградская область	0.100	0.147	0.082
Ненецкий Автономный округ	0.120	0.248	0.072

ОЭС Средней Волги

В данном регионе все субъекты продемонстрировали долгосрочный рост, за исключением Самарской области, где наблюдается негативный тренд. Особенно высокий уровень роста показателей КИУМ отмечается в Республике Марий-Эл (рис. 9).

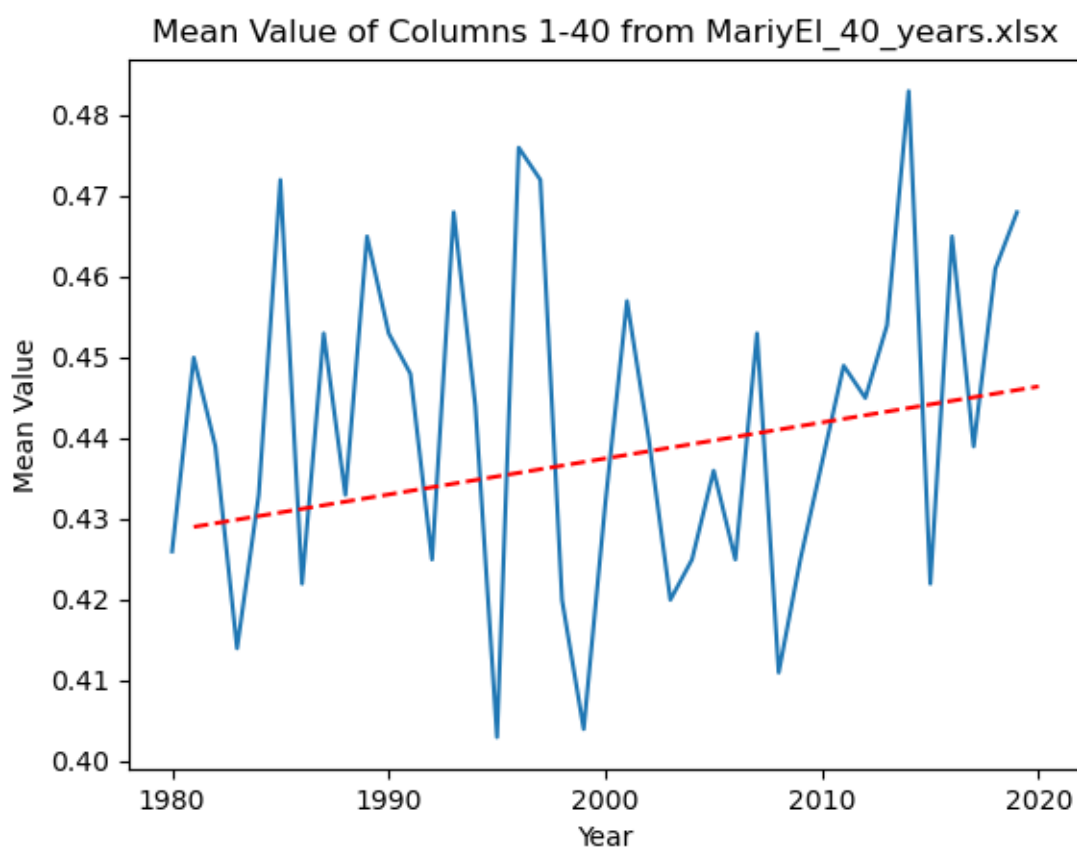


Рисунок 9 — график среднегодовых КИУМ и тренд по Республике Марий-Эл

В Поволжье не произошло существенных изменений за 40 лет, показатели остались на том же уровне. Анализ по графикам Boxplot выявил

нормализацию околонулевых значений, а также появление аномальных точек над верхней границей диапазона графика (рис. 10).

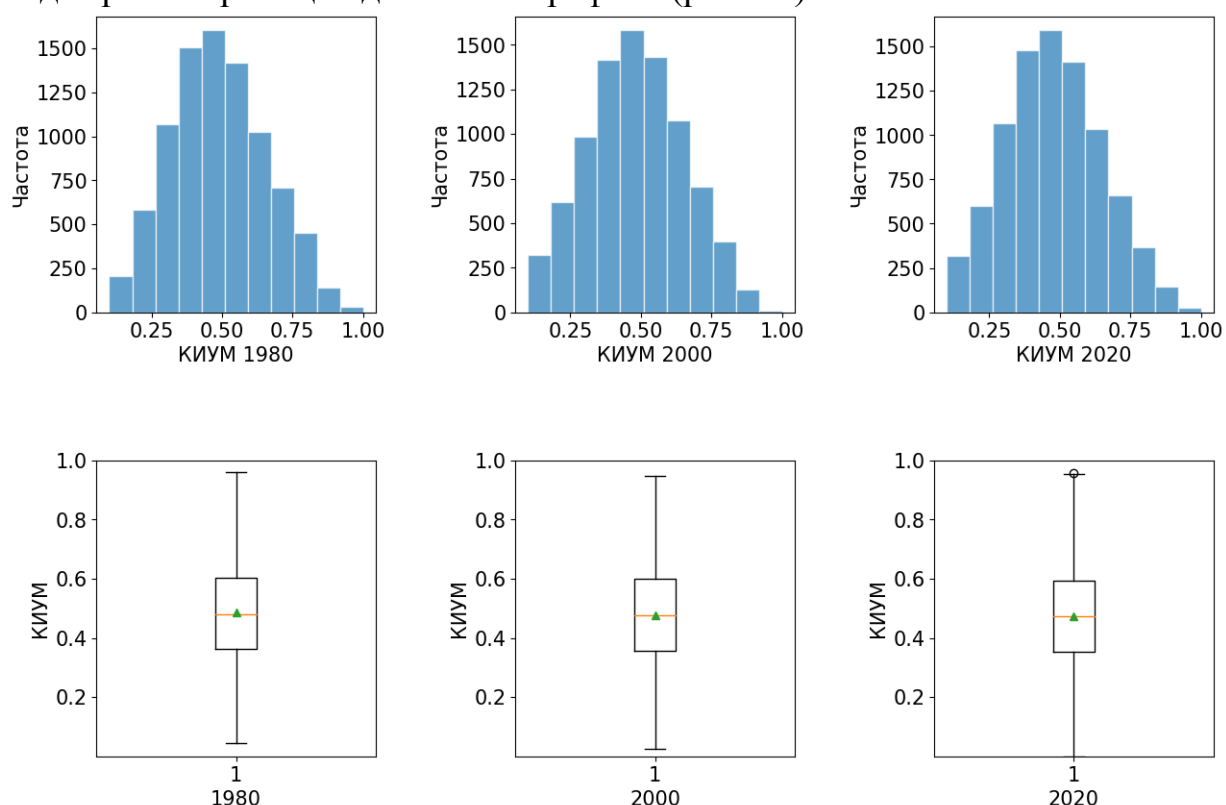


Рис. 10 – показатели Самарской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

Минимальная гарантированная выработка в период пиковой нагрузки в регионе составляет 0,005 (табл. 4).

Таблица 4 – минимальная гарантированная выработка в часы максимальной нагрузки ОЭС Волги (по регионам)

Регион	1980	2000	2020
Пензенская область	0.081	0.035	0.227
Республика Мордовия	0.041	0.154	0.108
Республика Татарстан	0.048	0.184	0.016
Республика Марий-Эл	0.139	0.032	0.005
Саратовская область	0.397	0.245	0.221
Нижегородская область	0.054	0.118	0.139
Ульяновская область	0.100	0.073	0.041
Чувашская республика	0.153	0.107	0.018
Самарская область	0.155	0.136	0.005

Большинство субъектов в данном регионе проявили долгосрочный рост, в то время как два соседних региона, а именно Оренбургская и Челябинская области, показали нисходящий тренд по среднегодовым показателям КИУМ за 40 лет. Наибольший рост был зафиксирован в Ханты-Мансийском автономном округе (рис. 11).

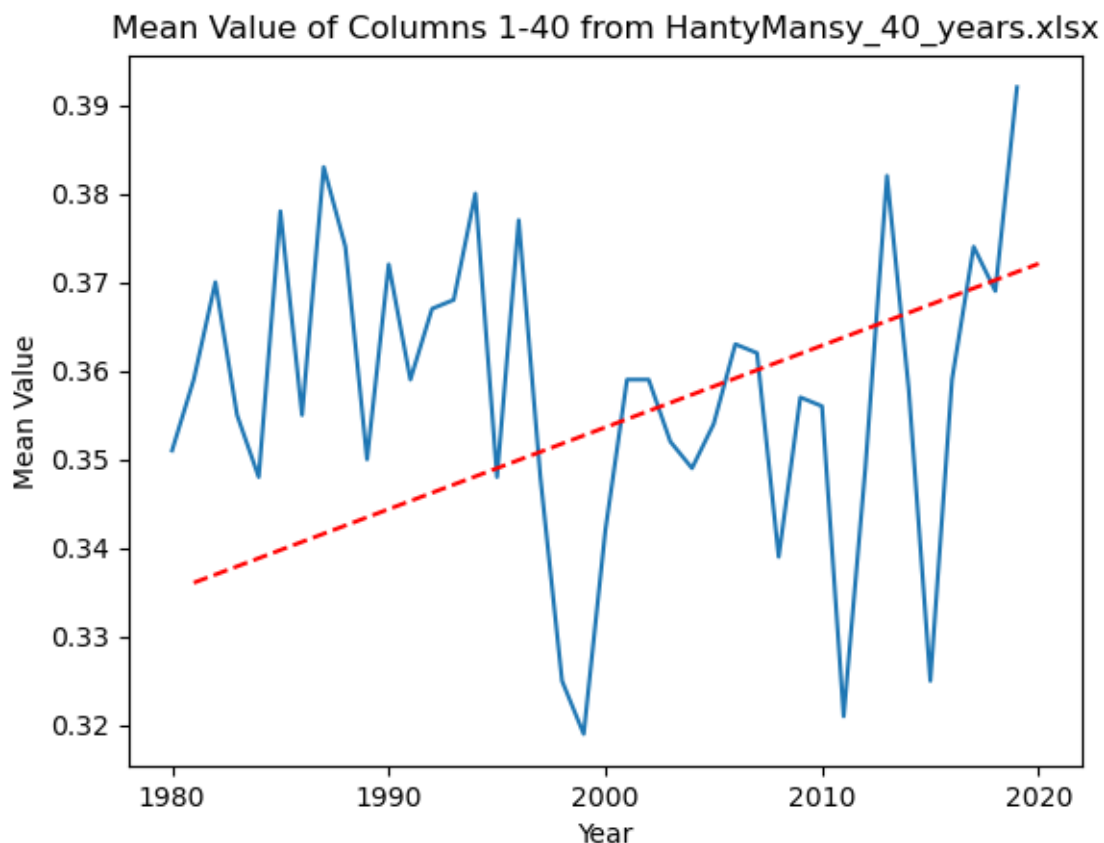


Рисунок 11 — график среднегодовых КИУМ и тренд по ХМАО

За Уралом произошли небольшие изменения показателей — В Челябинской, Курганской, Омской, Новосибирской областях изменилась частота средних показателей. Графики Voxplot показывают похожую тенденцию с регионами Средней Волги — нормализацию околонулевых значений с изменением границ нижних квантилей графика до нуля, а также увеличением разброса аномально высоких значений (рис. 12).

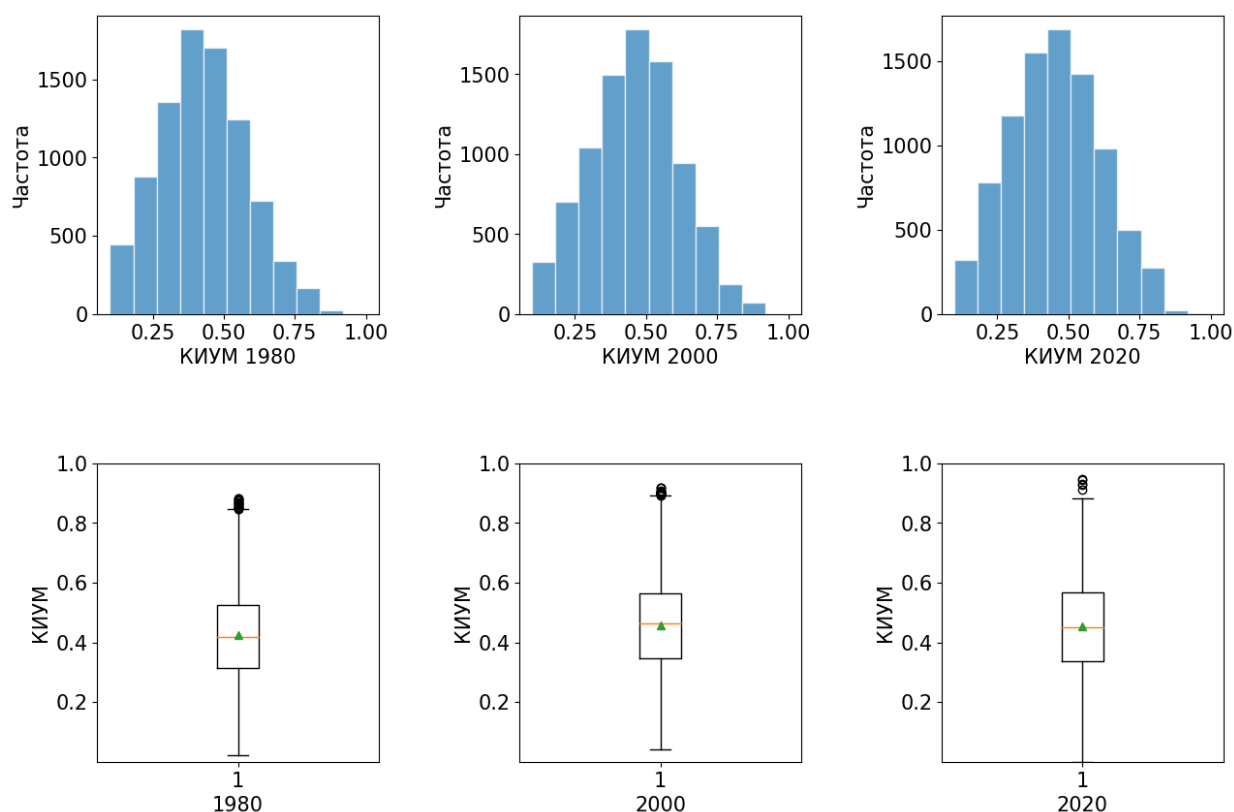


Рис. 12 – показатели Челябинской области (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

Минимальная гарантированная выработка в ветровой энергетике в часы максимальных нагрузок в регионе составляют 0,0036 в Удмуртии (табл. 5).

Таблица 5 – минимальная гарантированная выработка в часы максимальной нагрузки ОЭС Урала (по регионам)

Регион	1980	2000	2020
Ямало-Ненецкий АО	0.288	0.242	0,132
Свердловская область	0.048	0.007	0,111
Ханты-Мансийский АО	0.134	0.017	6 999
Республика Башкирия	0.193	0.098	4 833
Кировская область	0.046	0.024	4 433
Пермский край	0.089	0.03	4 233
Челябинская область	0.049	0.146	2 166
Тюменская область	0.055	0.04	2 133
Оренбургская область	0.149	0.060	1 566
Республика Удмуртия	0.288	0.242	0,132
Курганская область	0.048	0.007	0,111

У всех субъектов в регионе отмечено возрастание среднегодовых показателей КИУМ за 40 лет. Наибольший рост среднегодовых значений КИУМ наблюдается у Омской области (рис. 13).

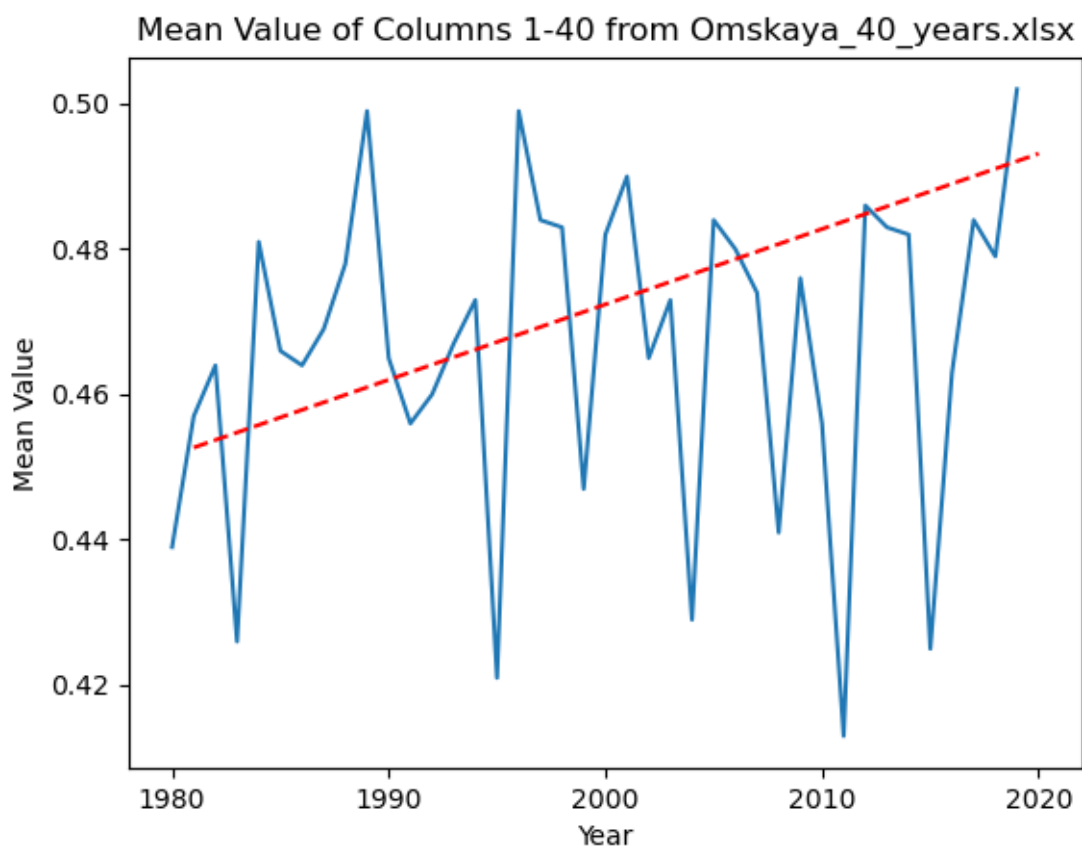


Рисунок 13 — график среднегодовых КИУМ и тренд по Омской области

В Алтайском крае увеличилась частота средних показателей при уменьшении частоты высоких и низких показателей. Кроме этого, с помощью анализа графиков Boxplot удалось выяснить, что в регионах Сибири прослеживается тенденция, которая наблюдается у регионов Средней Волги и Урала – нижний квантиль графика достигли нулевых значений, верхний квантиль стал выше при отсутствии изменений в меридиане. Помимо этого, появились аномально высокие значения, что свидетельствует о тенденции к увеличению верхнего квантиля графика в будущем (рис. 14).

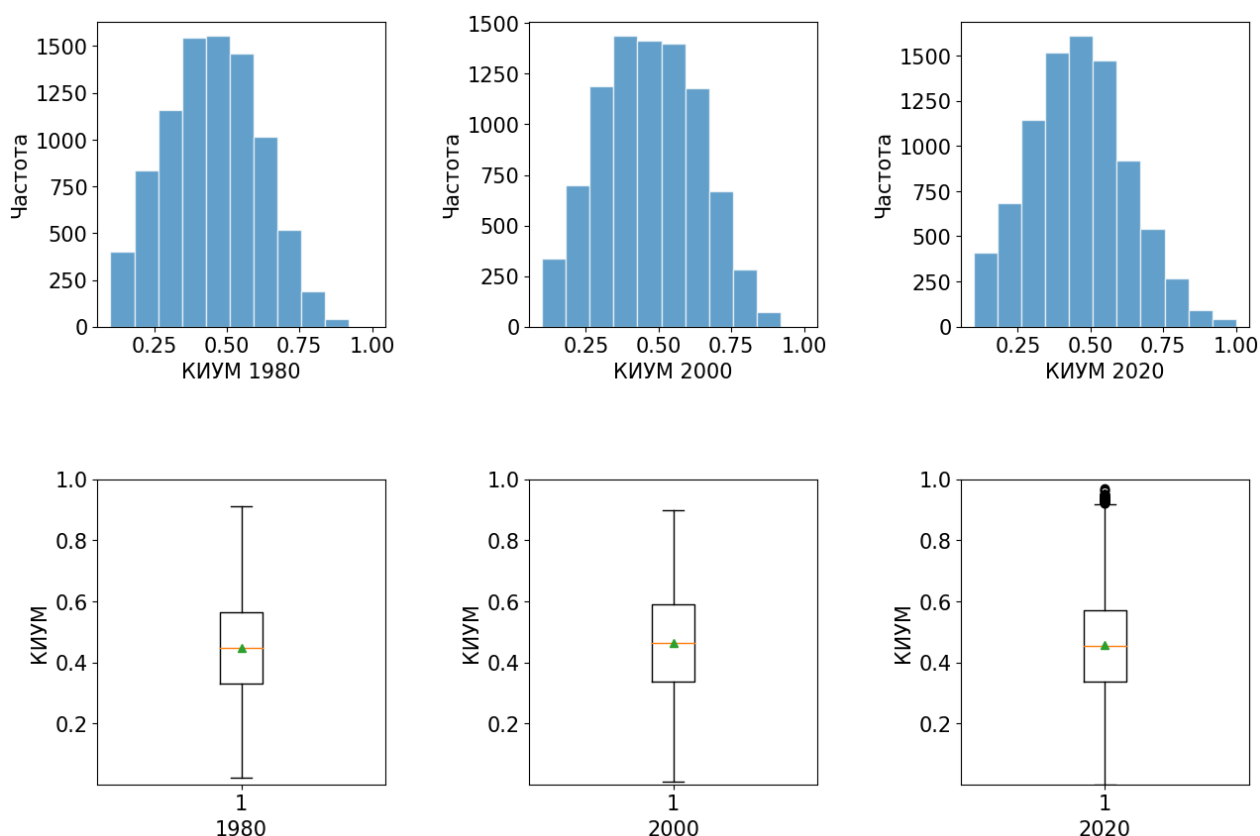


Рис. 14 – показатели Алтайского Края (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

Минимальная гарантированная выработка в долях установленной мощности составляет 0,0026 (табл.6).

Таблица 6 – минимальная гарантированная выработка в часы максимальной нагрузки ОЭС Сибири (по регионам)

Регион	1980	2000	2020
Забайкальский край	0.012	0.005	0.178
Новосибирская область	0.096	0.108	0.062
Республика Алтай	0.041	0.023	0.034
Алтайский край	0.071	0.132	0.028
Республика Хакасия	0.022	0.021	0.015
Кемеровская область	0.072	0.010	0.002
Красноярский край	0.065	0.078	0.059
Иркутская область	0.021	0.007	0.038
Республика Тыва	0.034	0.008	0.019
Омская область	0.012	0.005	0.178
Республика Бурятия	0.096	0.108	0.062
Томская область	0.041	0.023	0.034

Все субъекты на Дальнем Востоке (включенные в ОЭС) показали спад среднегодовых значений и вместе с изолированными регионами возглавляют антирейтинг по спаду КИУМ за 40 лет. Наименьший спад в регионе — у Амурской области (рис. 15).

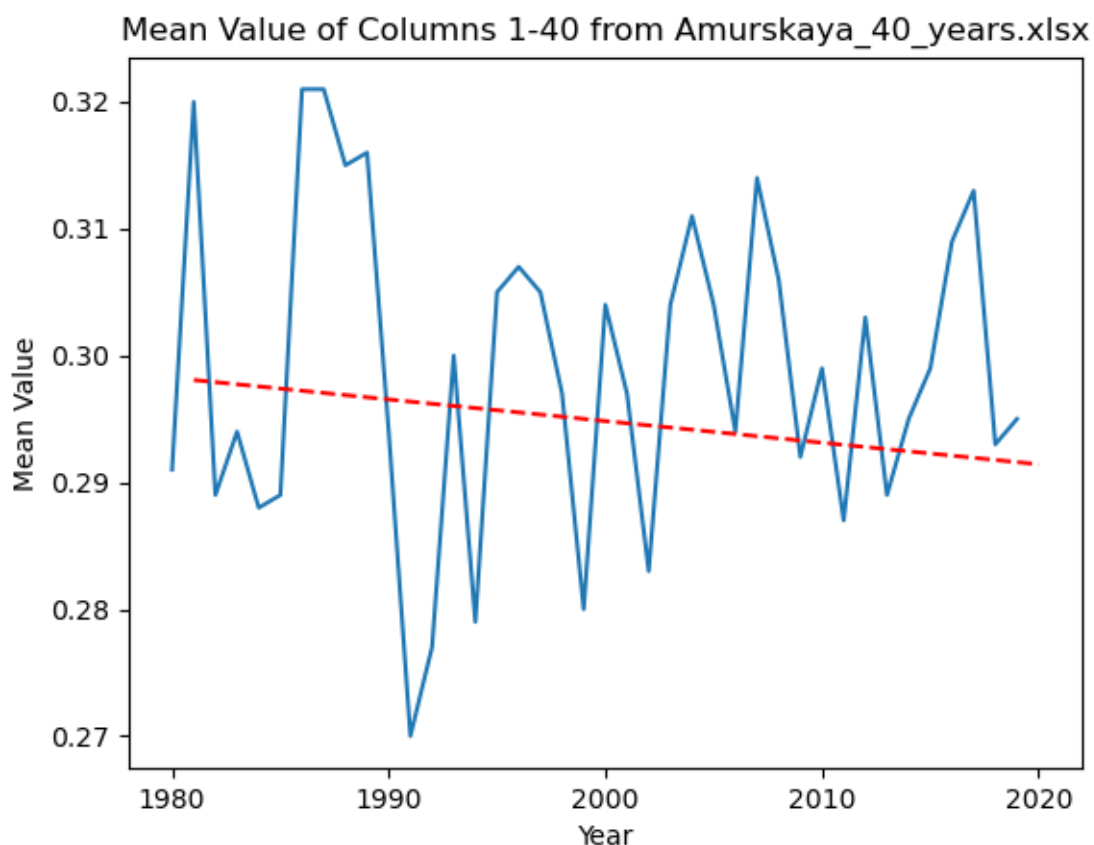


Рисунок 15 — график среднегодовых КИУМ и тренд по Амурской области

На Дальнем Востоке почти не выявлено регионов, где сильно изменилась ситуация с распределением КИУМ за 40 лет. Исключение составляет Сахалин — в регионе наблюдается увеличение частоты низких значений (до 0,1) при уменьшении высоких значений от 0,8 до 1, но данный регион является изолированным. Анализ графиков Boxplot в регионе вывел уменьшение количества anomalно высоких значений, снижение нижнего диапазона графика до нулевой отметки (рис. 16).

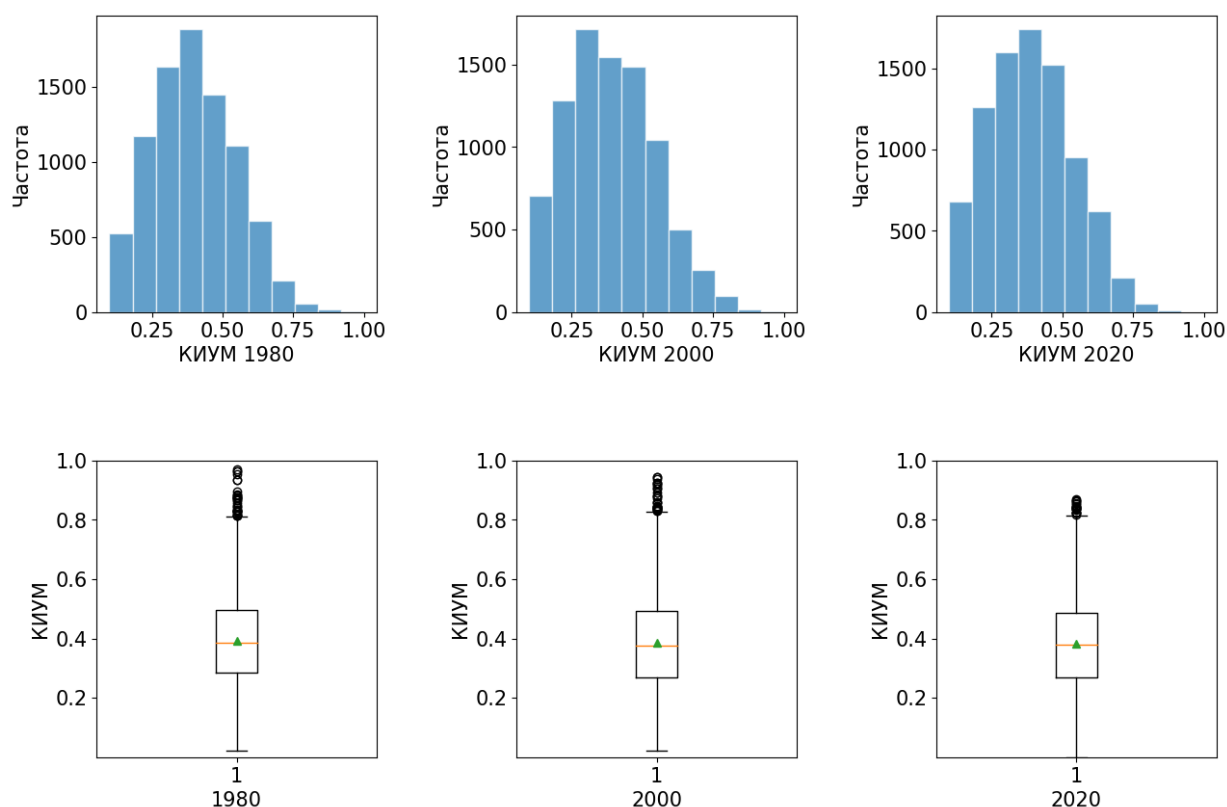


Рис. 16 — показатели Приморского Края (вверху — распределение часовых показателей КИУМ за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020; внизу — графики boxplot за 1980-1982, 1999-2001 и 2018-2020)

Изолированные регионы

Все изолированные субъекты показали снижение среднегодовых показателей КИУМ за 40 лет и являются лидерами антирейтинга по росту значений КИУМ. Наименьший спад — у Камчатского Края.

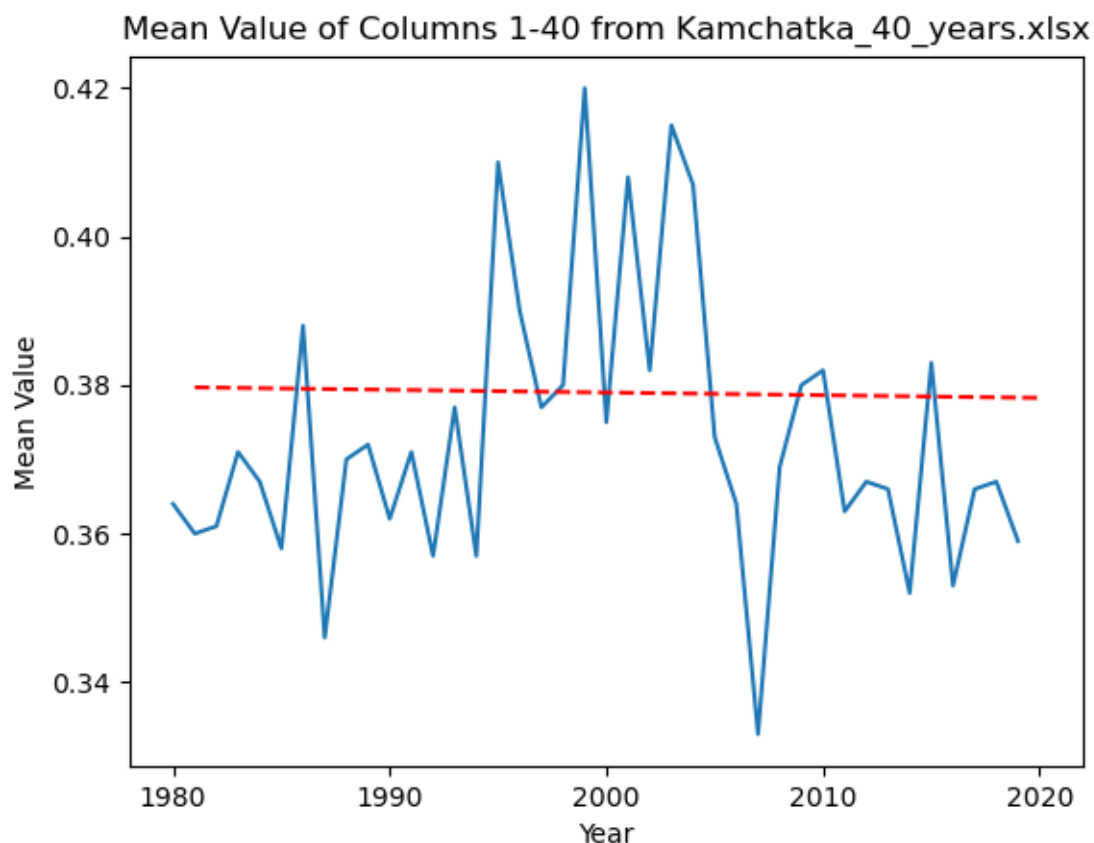


Рисунок 17 — график среднегодовых КИУМ и тренд по Камчатскому краю

Сопоставление регионов (Среднее значение и диапазон трендов)

На основе проведенного анализа по данным КИУМ были составлены несколько таблиц с разными показателями — 20 лучших субъектов по среднему значению КИУМ и диапазону трендов КИУМ (табл.7, 8).

Таблица 7 – список регионов с наибольшими средними значениями КИУМ за год

Регион	Средний КИУМ за 2018-2020
Курганская область	0.512
Москва	0.505
Калининградская область	0.501
Ненецкий АО	0.501
Тульская область	0.495
Владимирская область	0.489
Рязанская область	0.489
Омская область	0.488
Московская область	0.485

Тюменская область	0.485
Липецкая область	0.480
Республика Татарстан	0.480
Тамбовская область	0.479
ЯНАО	0.479
Ростовская область	0.478
Санкт-Петербург	0.478
Калужская область	0.477
Пензенская область	0.477
Нижегородская область	0.476
Оренбургская область	0.476

Таблица 8 — регионы с наибольшим показателем восходящего тренда (по среднегодовым показателям КИУМ)

Регион	Тренд
Республика Калмыкия	0.062
Астраханская область	0.049
Ставропольский край	0.045
Омская область	0.040
Республика Хакасия	0.039
Ростовская область	0.037
Ханты-Мансийский АО	0.036
Республика Дагестан	0.034
Волгоградская область	0.033
Тюменская область	0.032
Республика Алтай	0.030
Ямало-Ненецкий АО	0.029
Кемеровская область	0.028
Республика Коми	0.026
Москва	0.026
Ненецкий АО	0.025
Владимирская область	0.025
Белгородская область	0.024
Калужская область	0.024
Иркутская область	0.023

Курсивом выделены те регионы, которые присутствуют во всех таблицах. Можно составить еще одну таблицу со всеми сводными данными:

Таблица 9 — Сводная таблица из регионов, присутствующих во всех таблицах

Регион	Средний КИУМ за 2020 г.	Показатель восходящего тренда
--------	-------------------------	-------------------------------

Москва	0.505	0.026
Ненецкий АО	0.501	0.025
Владимирская область	0.489	0.025
Омская область	0.488	0.040
ЯНАО	0.479	0.028
Ростовская область	0.478	0.037
Калужская область	0.477	0.024

Таким образом, представленные данные свидетельствуют о наиболее стабильном и продолжительном росте в указанных регионах, что делает их потенциально наиболее выгодными для развития ветроэнергетики в будущем. Географические закономерности, выявленные в данном исследовании, указывают на то, что три региона из представленной таблицы находятся в одной общей экономической системе и географически соседствуют друг с другом. Кроме того, Ямало-Ненецкий автономный округ и Ненецкий автономный округ также граничат друг с другом.

Сопоставление регионов (Среднее значение и минимальная гарантированная выработка)

На основе данных были составлены две таблицы – 20 регионов с лучшими показателями минимальной гарантированной выработки и 20 регионов с наибольшими средними показателями КИУМ. Курсивом выделены те регионы, которые присутствуют в двух таблицах (табл. 10, 11)

Таблица 10 – список регионов с лучшими показателями минимальной гарантированной выработки

Регион	1980	2000	2020
Пензенская область	0.081	0.036	0.228
Ленинградская область	0.025	0.118	0.211
Белгородская область	0.075	0.022	0.206
Санкт-Петербург	0.092	0.137	0.200
Забайкальский край	0.012	0.005	0.178
Республика Карелия	0.069	0.132	0.158
Волгоградская область	0.199	0.066	0.153
Мурманская область	0.115	0.292	0.145
Республика Адыгея	0.051	0.001	0.131
Ставропольский край	0.067	0.001	0.115

Архангельская область	0.084	0.172	0.110
Республика Мордовия	0.041	0.154	0.108
Краснодарский Край	0.033	0.003	0.100
Псковская область	0.016	0.203	0.077
Новосибирская область	0.096	0.108	0.063
Республика Коми	0.054	0.247	0.063
Ямало-Ненецкий АО	0.288	0.242	0.132
Свердловская область	0.048	0.008	0.112
Ханты-Мансийский АО	0.134	0.017	0.069

Таблица 11 – список регионов с наибольшими средними значениями КИУМ за год

Регион	Средний КИУМ за 2018-2020
Курганская область	0.512
Москва	0.505
Калининградская область	0.501
Ненецкий АО	0.501
Тульская область	0.495
Владимирская область	0.489
Рязанская область	0.489
Омская область	0.488
Московская область	0.485
Тюменская область	0.485
Липецкая область	0.480
Республика Татарстан	0.480
Тамбовская область	0.479
ЯНАО	0.479
Ростовская область	0.478
Санкт-Петербург	0.478
Калужская область	0.477
Пензенская область	0.477
Нижегородская область	0.476
Оренбургская область	0.476

Из этих таблиц можно сделать сводную таблицу с регионами, которые присутствуют в двух таблицах:

Таблица 12 – регионы, которые присутствуют в двух таблицах (минимальная гарантированная выработка и среднегодовой КИУМ)

Регион	Минимальная выработка за 2018-2020	Средние значения КИУМ за 2018-2020
ЯНАО	0,132	0.479
Санкт-Петербург	0.200	0.478
Пензенская область	0.228	0.477

В результате получилась таблица, в которой оказалось 1 регион из ОЭС Центра, 1 регион из ОЭС Урала и 1 регион из ОЭС Северо-Запада. Соответственно, данные регионы являются наиболее перспективными регионами для развития в них ветряной энергетики.

Вывод по ветряной энергетике

В большинстве регионов ОЭС наблюдается увеличение среднегодовых значений КИУМ за последние 40 лет, что может быть обусловлено климатическими изменениями, охватившими мир в последние десятилетия. Однако регионы, расположенные на Дальнем Востоке, являются исключением, поскольку везде там наблюдается тенденция к снижению среднегодовых показателей, что, вероятно, также связано с климатическими изменениями в этом регионе.

Наиболее перспективными регионами для развития ветровой энергетики являются семь регионов — Москва, Владимирская область, Калужская область, Ростовская область, Омская область, Ненецкий автономный округ и Ямало-Ненецкий автономный округ. В этих регионах сочетается наибольший прирост среднегодовых значений КИУМ и высокий уровень КИУМ по сравнению с другими регионами.

Исходя из проанализированных данных, можно сделать вывод, что в ОЭС Центральной части России наблюдается тенденция к увеличению частоты средних значений КИУМ и уменьшению частоты низких значений в диапазоне от 0,1 до 0,4, что связано в целом с климатическими изменениями в мире, а также с уменьшением лесного покрова в регионах. Крым и Севастополь по показателям КИУМ приближаются к показателям регионов, расположенных на юге России. За Уралом наблюдается увеличение частоты средних показателей КИУМ в некоторых регионах.

Дополнительный анализ графиков Boxplot по регионам выявил тенденцию, по которой у регионов Средней Волги, Урала и Сибири, а также некоторых регионов Северо-Запада, Юга и Центра (граничащих с вышеперечисленными зонами) наблюдалось увеличение разброса значений на графике, нормализацию околонулевых значений на нижнем диапазоне графика, а также увеличение аномальных значений, чаще всего выше основного графика, что свидетельствует о последующем увеличении разброса значений в будущем.

Анализ всех регионов на предмет среднегодового КИУМ и минимальной гарантированной выработки показал, что наиболее перспективными регионами для развития ветряной энергетики (при такой методике) являются Пензенская область, Ямало-Ненецкий автономный округ и Санкт-Петербург. Сопоставляя два метода оценки наиболее перспективных регионов — Ямало-Ненецкий Автономный Округ обладает наибольшими перспективами развития в нем ветровой энергетики, так как сочетает в себе ненулевые показатели в часы пиковой нагрузки, высокое значение среднегодового КИУМ среди других

регионов, а также возрастающий тренд среднегодовых значений за 40 лет наблюдения.