ООО «Сигма Тау»
Москва, шоссе Энтузиастов, 56, стр. 44, пом. 13 (офис 1006),
111123 ОГРН: 1177746277323; ИНН: 7720374490; КПП: 772001001
www.sigma-tau.xyz info@sigma-tau.xyz
8 (499) 398-28-88

РАБОЧАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы

Выполнение расчетов при распределении инъекционных объемов компенсационного нагнетания манжетных колонн 3 яруса с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов за период с начала компенсационного нагнетания при выравнивании станционного узла Загорской ГАЭС-2 в 2024 году

Том 1

П-33/13-129

Москва
2025

ООО «Сигма Тау»
Москва, шоссе Энтузиастов, 56, стр. 44, пом. 13 (офис 1006),
111123 ОГРН: 1177746277323; ИНН: 7720374490; КПП: 772001001
www.sigma-tau.xyz info@sigma-tau.xyz
8 (499) 398-28-88

РАБОЧАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы

Выполнение расчетов при распределении инъекционных объемов компенсационного нагнетания манжетных колонн 3 яруса с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов за период с начала компенсационного нагнетания при выравнивании станционного узла Загорской ГАЭС-2 в 2024 году

Том 1

П-33/13-129

Генеральный директор, к.т.н. А.Н. Симутин

Главный инженер, к.т.н. А.В. Дейнеко

Москва
2025

Список исполнителей

Генеральный директор, к.т.н.		А.Н. Симутин
Главный инженер, к.т.н.		А.В. Дейнеко
Главный специалист, к.т.н.		Д.А. Власов
Ведущий инженер		М.С. Цымбалюк
Инженер 1-кат.		Н.А. Рослов

Содержание

Список исполнителей 2
Содержание 3
1. Общие сведения 4
1.1. Основание 4
1.2. Цель работы 4
1.3. Задачи работы 5
2. Нормативные и иные источники информации 6
3. Краткое описание объекта, условий строительства и выравнивания высотного положения 9
3.1. Состав сооружений 9
3.2. Основные параметры объекта 11
3.3. Инженерно-геологические условия 13
3.4. Просадка здания ГАЭС 14
3.5. Пространственное положение здание ГАЭС 16
3.6. Выравнивание здания ГАЭС 19
4. Анализ результатов фактически выполненных инъекционных работ 22
5. Анализ данных мониторинга высотного положения бетонных сооружений 64
6. Оптимизации сменных зданий на основе математического моделирования методом конечных элементов с учетом результатов мониторинга и накопленных инъекционных объемов 72
6.1. Методика оптимизации распределения объемов компенсационного раствора на основе математического моделирования методом конечных элементов с использованием теории планирования эксперимента 72
6.2. Методика оптимизационных расчетов на основе несимметричных форм распределения объемов компенсационного раствора 75
6.3. Методика оптимизационных расчетов на основе симметричных форм распределения объемов компенсационного раствора 77
6.4. Методика оптимизационных расчетов на основе генеративных форм распределения объемов компенсационного раствора 81
7. Разработка сменных заданий 83
8. Выводы и рекомендации 87
Приложение А. Техническое задание 88
Приложение Б. Сменные задания. Нагнетание Н3 ..... том 2
Приложение В. Сменные задания. Нагнетание Н4 ..... том 3
Приложение Г. Сменные задания. Нагнетание Н5 ..... том 4
Приложение Д. Сменные задания. Нагнетание Н6 ..... том 5

1. Общие сведения

1.1. Основание

Договор и техническое задание на выполнение работ между ООО «Сигма Тау» и АО «Институт Гидропроект» № П-33/13-129 от 15.08.2024 по теме: «Выполнение расчетов при распределении инъекционных объемов компенсационного нагнетания манжетных колонн 3 яруса с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов за период с начала компенсационного нагнетания при выравнивании станционного узла Загорской ГАЭС-2 в 2024 году».

1.2. Цель работы

Работа направлена на выравнивание высотного положения здания Загорской ГАЭС-2 на реке Кунье, нарушенного в результате инцидента 17.09.2013, методом управляемого компенсационного нагнетания.

Целью работы является оптимизация распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания на ярусе 3 манжетных колонн с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов на предыдущих ярусах манжетных колонн за период с начала работ по компенсационному нагнетанию. Работа является составной частью научно-технического сопровождения процесса компенсационного нагнетания и направлена на обеспечение эффективности компенсационного нагнетания путем учёта фактических данных, полученных по ходу проведения работ. В ходе выполнения работы допускается корректировка распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания в порядке научно-технического сопровождения, как предусмотрено указаниями рабочей документации.

Непосредственной целью работы является разработка сменных заданий в количестве 15 комплектов на 45 инъекционных манжетных колонн 3 яруса с количеством от 63 до 140 манжет в каждой манжетной колонне и объемом 250-300 м^3 компенсационного раствора на один комплект сменных заданий с оптимизацией параметров инъекционных работ, а именно распределения нагнетаний в плане, последовательности нагнетаний, скорости инъектирования, с целью достижения безопасного вертикального перемещения здания станции.

1.3. Задачи работы

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- анализ проектной документации и иных имеющихся исходных данных;
- анализ результатов фактически выполненных инъекционных работ на дату выдачи технического задания, включая отчётные материалы по 8, 7, 6, 5 и 4 ярусам нагнетания по теме: «Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской Г АЭС-2 и восстановительные работы. Техническое сопровождение процесса восстановления высотного положения здания станционного узла Загорской ГАЭС-2»;
- анализ результатов мониторинга высотного положения бетонных сооружений станционного узла на дату выдачи технического задания;
- выполнение расчетов на основе математического моделирования методом конечных элементов для определения оптимального распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания на ярусе 4 манжетных колонн (с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов на предыдущих ярусах манжетных колонн за период с начала работ по компенсационному нагнетанию);
- разработка сменных заданий в количестве 15 комплектов, реализующих оптимальное для рассматриваемого этапа распределение инъекционных объемов, определенное расчётами;
- выработка выводов и рекомендаций.

2. Нормативные и иные источники информации

Нормативные документы:

2.1. Федеральный закон № 117-ФЗ от 21.07.1997 «О безопасности гидротехнических сооружений» (с изменениями на 08.08.2024).

2.2. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (с изменениями на 25.12.2023).

2.3. Приказ Росстандарта № 687 от 02.04.2020 «Об утверждении перечня документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований ФЗ от 30.12.2009 № 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений"» (с изменениями на 05.09.2024).

2.4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.

2.5. СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85.

2.6. СП 40.13330.2012. Плотины бетонные и железобетонные. Актуализированная редакция СНиП 2.06.06-85.

2.7. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87.

2.8. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003.

2.9. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*.

Специальные технические условия:

2.10. СТУ 1938-40-201. Специальные технические условия на проектирование и строительство Загорской ГАЭС-2 на р. Кунья. Изменение проектных решений устройства основания здания ГАЭС при проведении работ по стабилизации сооружений станционного узла и восстановлении высотного положения здания ГАЭС по технологии компенсационного нагнетания по адресу: Московская обл., Сергиево-Посадский район, пос. Богородское, д. 101.

Материалы, переданные Заказчиком в качестве исходных данных:

2.11. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Основные положения проекта. Пояснительная записка. Шифр 1938-40-094.1, изм. 4. М., Институт Гидропроект», 2017.

2.12. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Проект организации строительства. Пояснительная записка. Часть 1. Шифр 1938-40-094.8.1, изм. 4. М., Институт Гидропроект», 2017.

2.13. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Проект организации строительства. Пояснительная записка. Часть 2. Шифр 1938-40-094.8.2, изм. 5. М., Институт Гидропроект», 2017.

2.14. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Обследование несущих конструкций. Оценка состояние несущих конструкций и рекомендации по их усилению. Шифр 1938-40-094.ТО4, изм. 3. М., Институт Гидропроект», 2017.

2.15. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Обследование несущих конструкций. Оценка состояние несущих конструкций и рекомендации по их усилению. Приложение Г. Научно-технический отчет о численном моделировании процесса выравнивая здания ГАЭС по технологии компенсационного нагнетания. Шифр 1938-40-094.ТО4.П. М., Институт Гидропроект», 2017.

2.16. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Отчет об инженерно-геологических изысканиях. Шифр 1938-40-094.ИГИ.1, изм. 4. М., Институт Гидропроект», 2017.

2.17. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Отчет об инженерно-геологических изысканиях. Геотехническая часть. Шифр 1938-40-094.ИГИ.2, изм. 1. М., Институт Гидропроект», 2017.

2.18. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Разработка рабочей документации на период выравнивания здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 Расчетное определение параметров компенсационного нагнетания (количества инъекционного материала и его распределения) в основание здания Загорской ГАЭС-2 на реке Кунье, обеспечивающее выравнивание высотного положения здания ГАЭС (в 2-х томах). Шифр П-69/18-09-РД. М., ООО «Сигма Тау», АО «Институт Гидропроект», 2020.

2.19. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. ОКПД2 71.20.19. Выполнение расчетов по оптимизации распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания манжетных колонн с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов на ярусах с 8 по 5 манжетных колонн за период с начала компенсационного нагнетания при выравнивании станционного узла Загорской ГАЭС-2 в 2023 году, расположенного в Московской области, Сергиево-Посадском районе, рабочий поселок Богородское в рамках выполнения работ "Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Шифр П-35/19-02. М., ООО «Сигма Тау», АО «Институт Гидропроект», 2023.

2.20. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. ОКПД2 71.20.19. Выполнение расчетов при распределении инъекционных объёмов компенсационного нагнетания манжетных колонн 4 яруса с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объёмов за период с начала компенсационного нагнетания при выравнивании станционного узла Загорской ГАЭС-2 в 2023 году расположенного в Московской области, Сергиево-Посадском районе, рабочий поселок Богородское для выполнения работ "Ликвидация последствий осадки здании станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Разработка рабочей документации на период выравнивания здания станционного узла Загорской ГАЭС-2" в 2023 году. Шифр П-33/13-128. М., ООО «Сигма Тау», АО «Институт Гидропроект», 2023.

3. Краткое описание объекта, условий строительства и выравнивания высотного положения

3.1. Состав сооружений

Основные сооружения Загорской ГАЭС-2 располагаются в северо-восточной части Московской области в 20 км от г. Сергиева Посада и в 5 км от г. Краснозаводска в поселке городского типа Богородское в пойме реки Куньи и на ее левобережном плато. Площадка под Загорскую ГАЭС–2 расположена в непосредственной близости от действующей Загорской ГАЭС (рис. 3.1.1).

В состав основных сооружений Загорской ГАЭС-2 входят:

- здание Загорской ГАЭС-2, которое получило непроектную просадку в результате инцидента 17.09.2013;
- сооружения в нижнем бьефе: монтажная площадка, временная монтажная площадка, подпорные стены напорного фронта нижнего бьефа ПС-3, ПС-4, ПС-5, ПС-9, ПС-10, помещение пусковых тиристорных устройств (ППТУ № 4), сопрягающие подпорные стены верхнего бьефа, служебно-производственный корпус, среди указанных сооружений значительную непроектную просадку в результате инцидента 17.09.2013 получили ПС-3 и ППТУ № 4;
- четыре нитки сталежелезобетонных открытых напорных водоводов с внутренним диаметром 7,50 м, наружным диаметром 8,50 м, протяженность каждой нитки около 780 м, фундамент – буронабивные сваи диаметром 1,2 м с ростверком;
- сооружения в верхнем бьефе: ограждающая земляная дамба верхнего бассейна, водоприемник, встроенный в тело земляной дамбы, подпорные стены напорного фронта верхнего бьефа, сопрягающие подпорные стены верхнего бьефа;
- нижний аккумулирующий бассейн, представляющий собой водохранилище на реке Кунье, являющийся общим для Загорской ГАЭС и Загорской ГАЭС-2 (для создания необходимой дополнительной полезной емкости в размере 11,8 млн. м^3 для работы Загорской ГАЭС-2 выполнено расширение бассейна за счет углубления дна, разработки откосов существующего бассейна и предусмотрена дополнительная емкость в районе Краснозаводской поймы р. Куньи);
- реверсивный канал, сопрягающей напорный фронт сооружений нижнего бьефа с нижним аккумулирующем бассейном;
- верхний аккумулирующий бассейн, огражденный земляной дамбой, которая примыкает к существующей дамбе верхнего аккумулирующего бассейна Загорской ГАЭС;
- сооружения выдачи мощности, включающие в себя воздушные линии электропередач 500 кВ, КРУЭ-500 кВ, здание ППУ, компрессорную, кабельный туннель от СПК до ППУ.



Рисунок 3.1.1. Космоплан (Яндекс-карты) действующей Загорской ГАЭС и строящейся Загорской ГАЭС-2 (ЗаГАЭС-2)

3.2. Основные параметры объекта

Загорская ГАЭС-2 имеет следующие основные параметры:

Мощность: в генераторном режиме в насосном режиме	 840 МВт 1000 МВт
Число гидроагрегатов (нумерация гидроагрегатов принята со стороны монтажной площадки и Загорской ГАЭС)	4 ед. (№№ 7–10)
Напор расчетный: в генераторном режиме в насосном режиме	 100 м 97,5 м
Рабочая емкость бассейнов суточного регулирования	11,9 млн. м^3
Число часов работы: в генераторном режиме в насосном режиме	 3,5 часа 4 часа
Выработка электроэнергии при разряде при заряде	 2,9 ГВт·ч 3,9 ГВт·ч
Годовые показатели: выработка электроэнергии потребление электроэнергии	 1000 ГВт·ч 1350 ГВт·ч

Основные строительные параметры здания ГАЭС

Конструктивная схема	Монолитное железобетонное неразрезное
Длина (поперек потока)	106,83 м
Характерная ширина (вдоль потока по фундаментной плите)	74,33 м
Максимальная ширина (вдоль потока от консоли со стороны водоводов на отм. 149,85 до консоли реверсивного канала на отм. 166,40)	75,21 м
Характерная высота (от отм. 117,00 фундаментной плиты агрегатных блоков до отм. 166,40 кранового моста нижнего бьефа)	49,40 м
Максимальная высота (от отм. 115,00 фундаментной плиты приямка насосов осушения до отм. 171,13 парапета покрытия машзала)	56,13 м

На рисунке 3.2.1 представлен сводный координационный план здания ЗаГАЭС-2, на котором совмещены строительные оси здания с геодезической системой координат, используемой для устройства скважин в рамках работ по выравниванию методом управляемого компенсационного нагнетания.

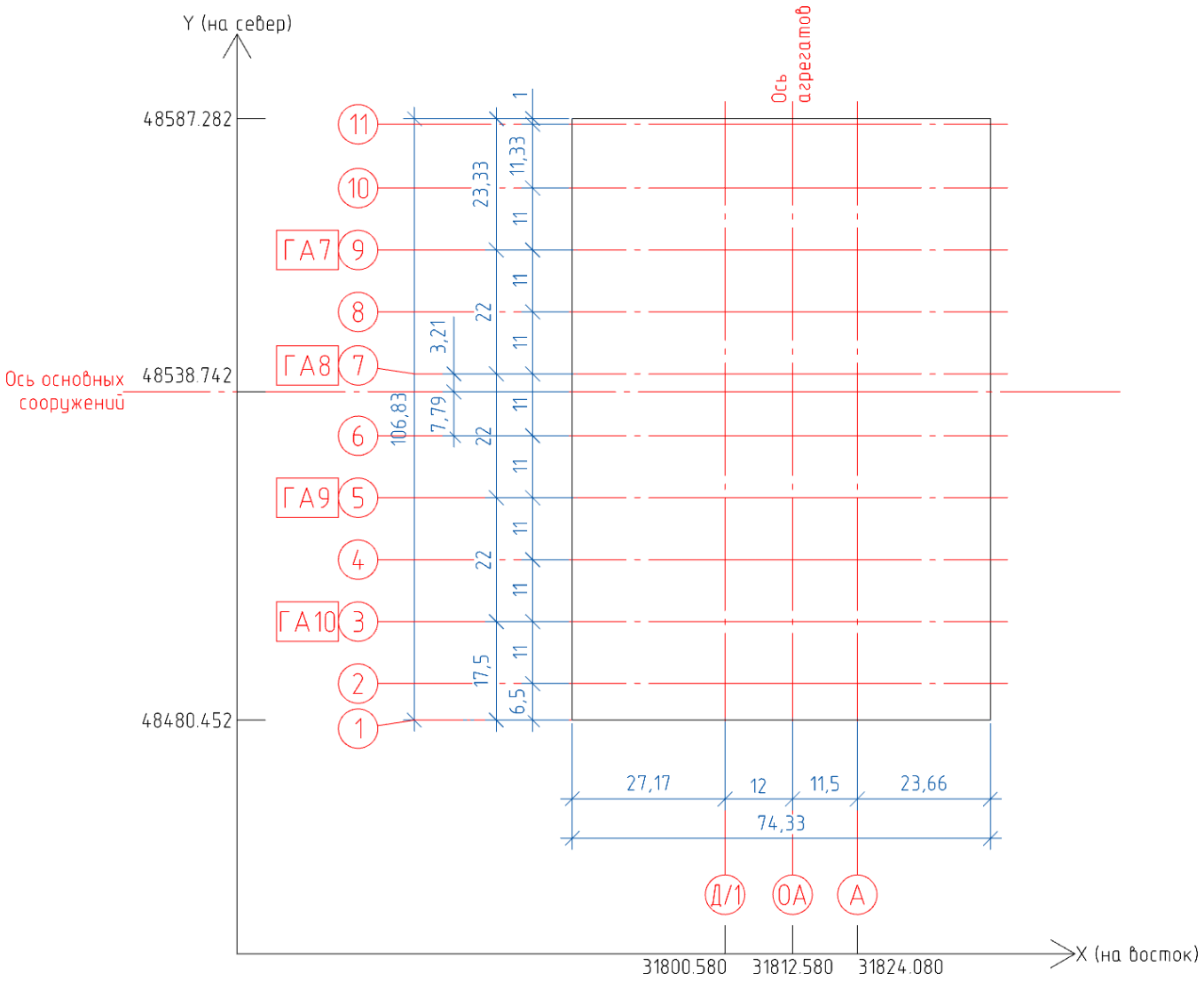


Рисунок 3.2.1. Сводный координационный план (габаритные размеры здания ГАЭС указаны по подошве фундаментной плиты)

3.3. Инженерно-геологические условия

Общее геологическое строение участка Загорской ГАЭС-2 определяется наличием двух структурно-стратиграфических ярусов.

Коренная часть изученного геологического разреза, сложенная, в основном, породами мелового возраста, представлена ритмично чередующимися пластами и пачками песчаного и глинистого состава. При этом в качестве основных выделяются (снизу вверх):

- альбаптские песчаные отложения с подчиненными прослоями глин (K1al2+ap), мощностью до 50 (абсолютные отметки 135–140);
- верхнеальбские (K1al3) глины черные, слюдистые (парамоновская свита), мощностью 30 м, с хорошо выдержанным положением кровли и подошвы (отметки 170 и 140);
- сеноманские (K2cm) мелко-среднезернистые пески мощностью 10–15 м. В присклоновой части мощность сокращается до 5–7 м за счет размывов и экзарации;
- сантонские зеленоцветные породы (K2 st), для которых в целом принято название «зеленые глины». Представлены в нижней части разреза преимущественно глинами зеленовато-бурыми, слюдистыми, в верхней части – глауконит-кварцевыми опоковидными песчаниками. Суммарная мощность пород составляет 15–20 м. Их эродированная кровля располагается в пределах абсолютных отметок 202,50–206,20.

Новейшие рыхлые отложения залегают в интервале отметок от 30 до 260. Они имеют сложное строение и широкий возрастной диапазон – от плиоцена до современности. При этом наибольшее распространение получили образования среднеплейстоценового возраста.

3.4. Просадка здания ГАЭС

Около 23 часов 17.09.2013 произошел инцидент, связанный с прорывом напорного фронта нижнего бьефа и затоплением котлована Загорской ГАЭС-2 и внутренних помещений здания ГАЭС до отм. 162,35 (соответствующей уровню воды в нижнем аккумулирующем бассейне в это время). Механизм прорыва напорного фронта заключался в образовании эрозионного канала непосредственно под фундаментной плитой здания ГАЭС в районе гидроагрегата № 10.

Образование эрозионного канала стало причиной неравномерной просадки здания ГАЭС и ПС-3 с навалом правого устоя здания ГАЭС на ПС-3. Неравномерная осадка и силовое взаимодействие со смежным сооружением, в свою очередь, вызвали изменение напряженно-деформированного состояния монолитных железобетонных конструкций здания ГАЭС и силовое трещинообразование.

График понижения уровня воды представлен на рисунке 3.4.1. За счет сработки нижнего аккумулирующего бассейна в течении нескольких часов уровень воды был понижен до отм. 155,5, и далее в течение 3 суток до отм. 152,8. Далее в течение двух месяцев уровень воды был понижен до отм. 148,2, на которой поддерживался до апреля 2014 года в течение работ по стабилизации здания ГАЭС. При этом положении выполнены работы по устройству теплового контура здания в связи с наступившим зимним периодом. Окончательно котлован был осушен к средине лета 2014 года.

В ходе работ по стабилизации здания ГАЭС эрозионный канал заполнен грунтом-заместителем из минеральных композиционных материалов, уложенных методом подводного бетонирования при уровне воды на отм. 148,2 с использованием скважин, пробурённых сквозь здание ГАЭС.

Состояние здания ГАЭС после стабилизации и осушения реверсивного канала представлено на рисунке 3.4.2.

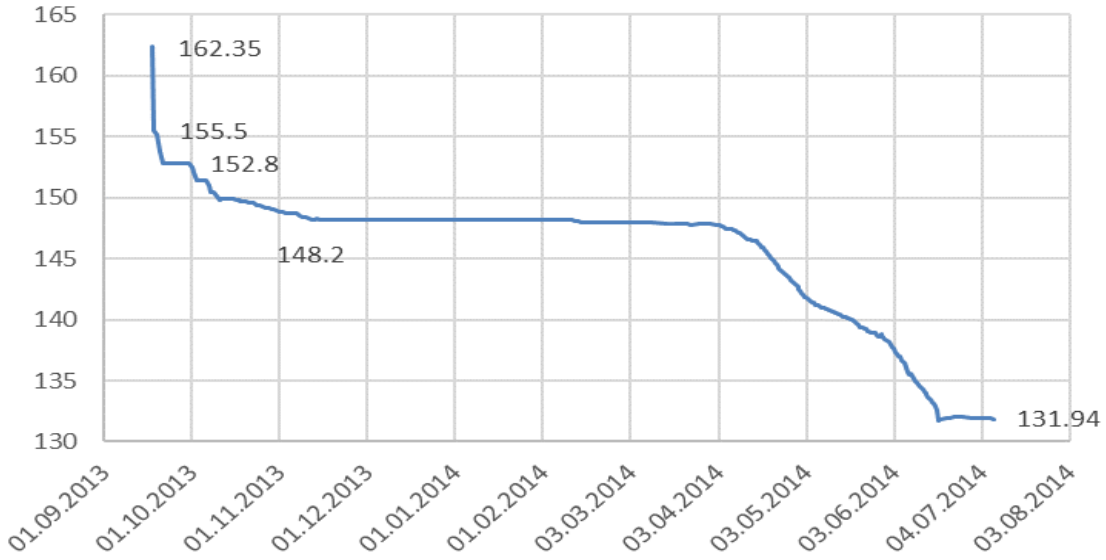


Рисунок 3.4.1. График сработки воды в реверсивном канале в 2013–2014 годах



Рисунок 3.4.2. Состояние нижнего бьефа здания ГАЭС в 2020 году (вид со стороны осушенного реверсивного канала): 1 – разность осадок на гребне реверсивного канала между ПС-3 и ПС-4; 2 – выход минеральных композиционных материалов, уложенных методом подводного бетонирования в районе гидроагрегата № 10

3.5. Пространственное положение здание ГАЭС

В результате инцидента 17.09.2013 здание ГАЭС приобрело сложное пространственное положение. Стабилизировавшееся высотное положение здание ГАЭС определено в [2.18] путем комплексирования инженерно-геодезических данных разных лет и представлено в таблицах 3.5.1–3.5.2 и на рисунках 3.5.1–3.5.4.

Таблица 3.5.1.

Параметры высотного положения в характерных сечениях вдоль потока

Характерное сечение	Координаты		Параметры высотного положение			
	по геодезической оси Y, м	от ПС-3, м	Осадка средняя, м	Перекос*, м	осадка со стороны напорных водоводов, м	осадка со стороны реверсивного канала, м
ДШ ПС-3	48480.452	0	-1.50	0.39	-1.58	-1.19
ГА 10	48497.952	17.500	-1.28	0.40	-1.39	-0.99
ГА 9	48519.952	39.500	-0.91	0.39	-1.05	-0.66
ГА 8	48541.952	61.500	-0.58	0.36	-0.74	-0.38
ГА 7	48563.952	83.500	-0.21	0.31	-0.41	-0.10
ДШ МП	48587.282	106.830	0.10	0.19	-0.03	0.16
* *Знак "+" соответствует повороту в сторону ПС-3*						

Таблица 3.5.2.

Параметры высотного положения в характерных сечениях вдоль оси агрегатов

Характерное сечение	Координаты		Параметры высотного положение			
	по геодезической оси Y, м	от ПС-3, м	Осадка средняя, м	Перекос*, м	осадка со стороны ПС-3, м	осадка со стороны МП, м
Грань со стороны водоводов	31773.410	-39.170	-0.85	1.55	-1.58	-0.03
Ось Д/1	31800.580	-12.000	-0.76	1.72	-1.61	0.11
Ось агрегатов	31812.580	0	-0.71	1.72	-1.59	0.14
Ось А	31824.080	11.500	-0.65	1.62	-1.47	0.15
Грань со стороны реверсивного канала	31847.740	35.160	-0.50	1.36	-1.19	0.16
* Знак "+" соответствует повороту в сторону водоводов						

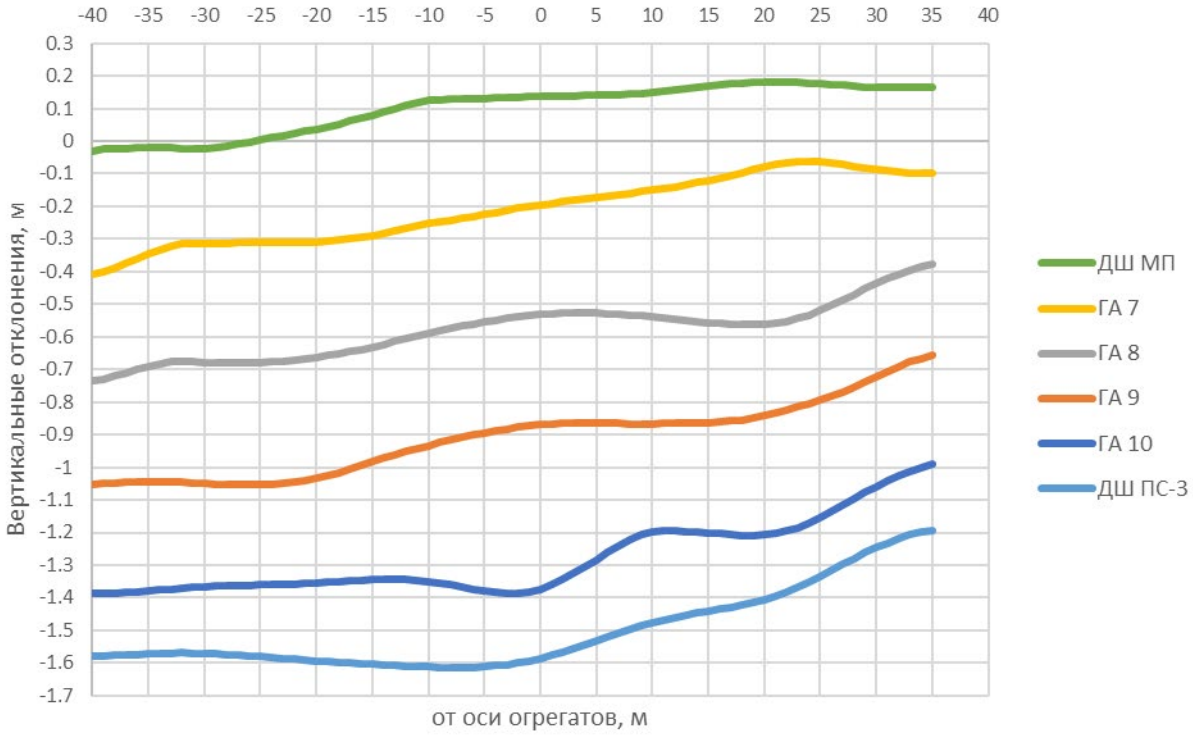


Рисунок 3.5.1. Вертикальные отклонения от проектного положения в сечениях вдоль потока

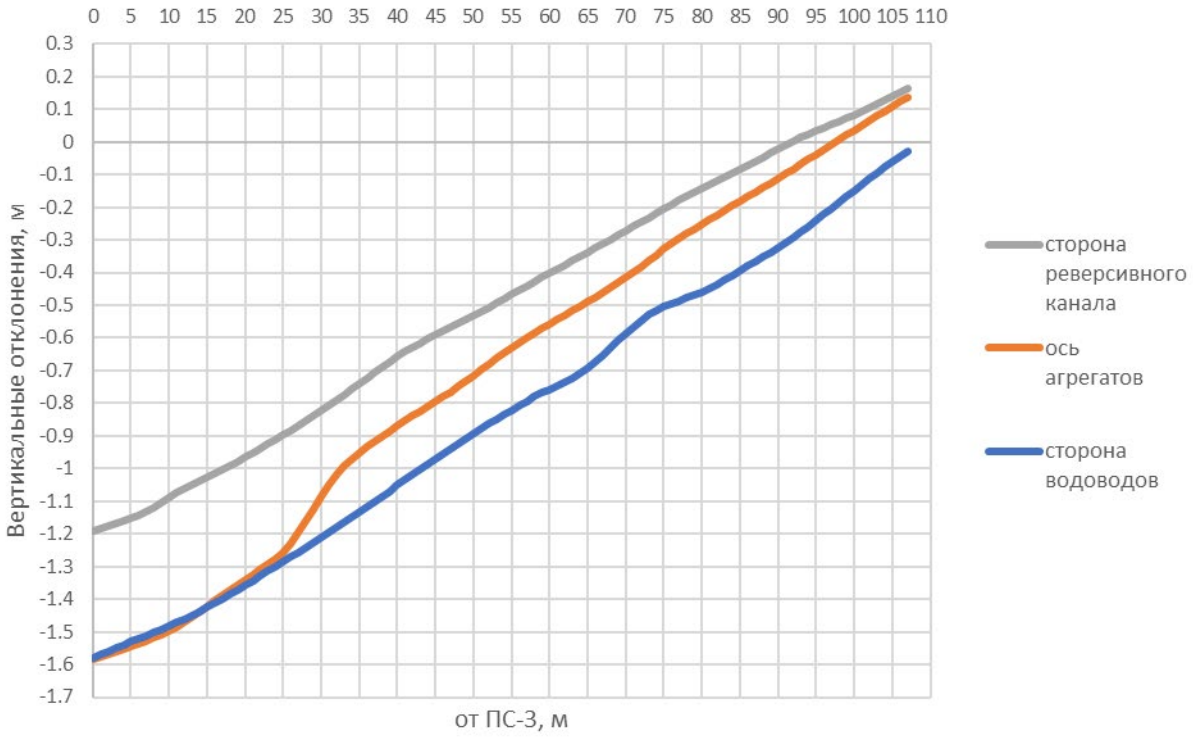


Рисунок 3.5.2. Вертикальные отклонения от проектного положения в сечениях вдоль оси агрегатов

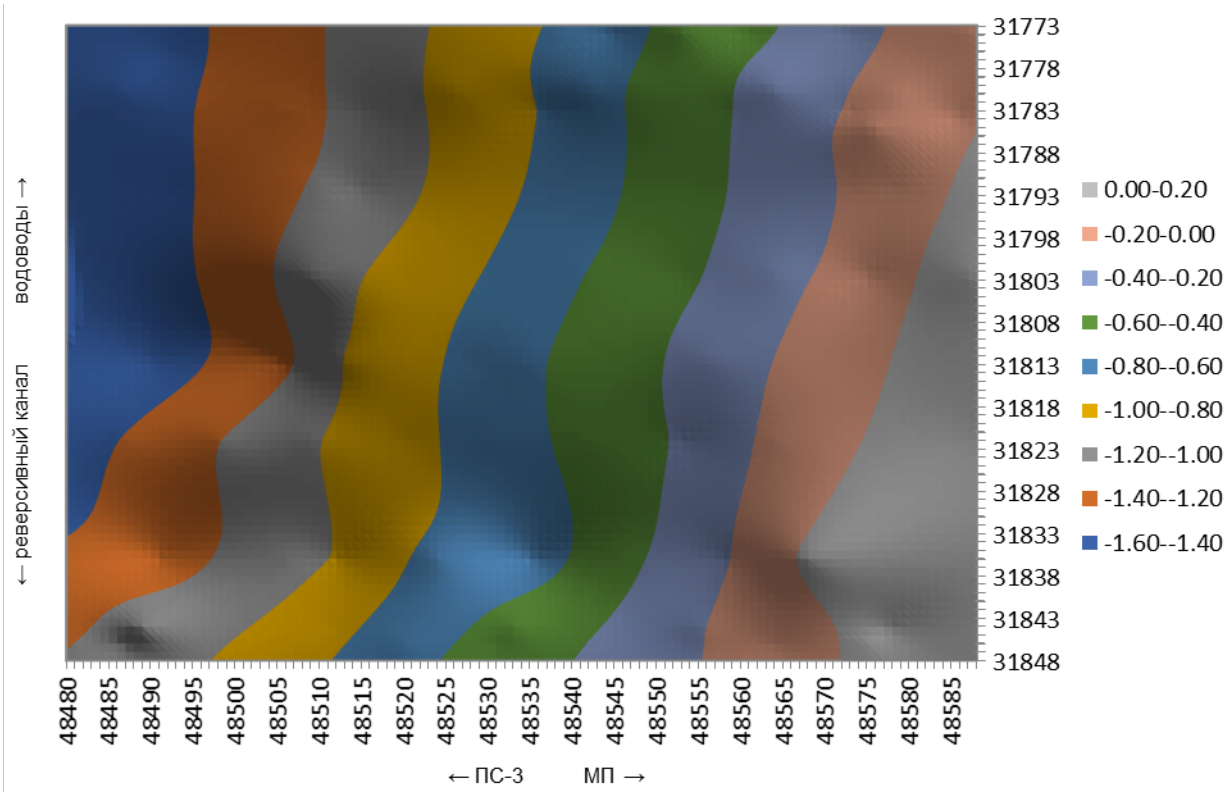


Рисунок 3.5.3. Изоповерхности вертикальных отклонений здания ГАЭС от проектного положения (плановое представление)

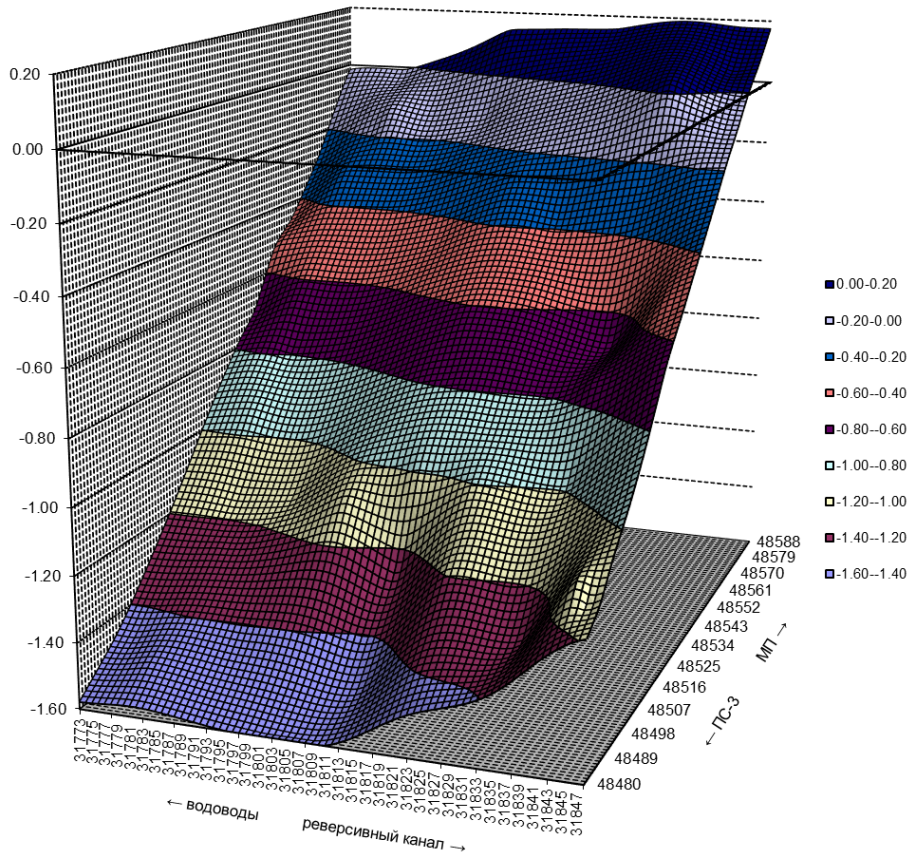


Рисунок 3.5.4. Изоповерхности вертикальных отклонений здания ГАЭС от проектного положения (пространственное представление)

3.6. Выравнивание здания ГАЭС

Восстановление здания Загорской ГАЭС-2 представляет собой комплекс работ по выравниванию высотного положения здания ГАЭС, т.е. устранению разности осадок в направлении вдоль и поперек потока, методом управляемого компенсационного нагнетания. Данный метод предусматривает выполнение работ в 2 этапа:

1-й этап – предварительная подготовка грунта посредствам заполнения пор и пустот высокопроницающим раствором (КН-1 или аналог) под низким давлением;

2-й этап – последующее компенсационное нагнетание инъекционного материала (КН-2 или аналог) с регулируемой вязкостью при проектном давлении и расходе.

Манжетные колонны устраиваются в криволинейных скважинах радиусом 140 м, выполненных методом горизонтально-направленного бурения. Звено манжетной колонны имеет длину 3,5 м и 7 манжет. По длине типовой скважины предусматривается 20 звеньев манжетной колонны, всего 70,0 м и 140 манжет.

Структура манжетного поля представлена на рисунках 3.6.1–3.6.3:

- по высоте скважины сгруппированы в ярусы, количество ярусов 8, нумерация от верхнего к нижнему;
- в плане в пределах каждого яруса скважины сгруппированы в ряды, на четных ярусах (№№ 8, 6, 4 и 2) по 46 скважин, на нечетных ярусах (№№ 7, 5, 3 и 1) по 45 скважин. Нумерация скважин в ряду принята начиная со стороны ПС-3 к монтажной площадке;
- нумерация манжет принята со стороны устья скважины в сторону забоя.

Скважины №№ 9-45 (9-46) каждого яруса типовые по 140 манжет, скважины №№ 1…8 каждого яруса имеют укороченный манжетный участок.

Выравнивание здания ГАЭС методом управляемого компенсационного нагнетания является уникальной строительной операцией, не имеющей прецедентов в мировой практике. С целью обеспечение сохранности здания ГАЭС на всех этапах работ по выравниванию проектом [2.18] предусмотрены научно-техническое сопровождение и технический мониторинг согласно п. 10.5 ГОСТ 27751-2014, мониторинг планово-высотного положения здания ГАЭС, наблюдение за раскрытием трещин и стыков.

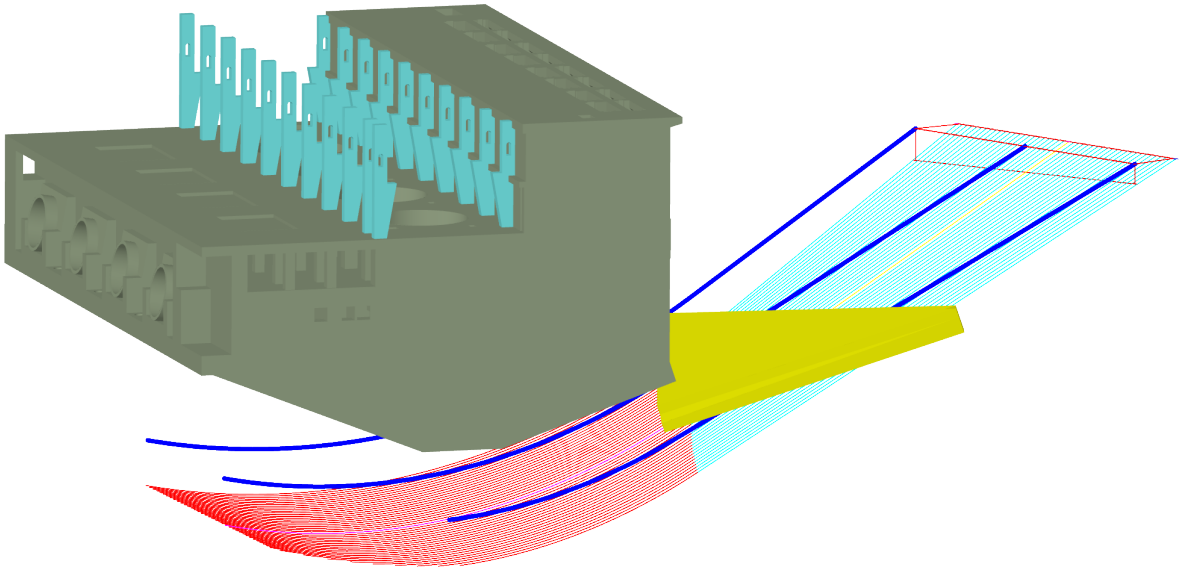


Рисунок 3.6.1. Пространственная компоновка зоны нагнетания и здания ГАЭС. Вид с юго-запада (со стороны водоводов и ПС-3). Схема скважин яруса 8 (нижнего): голубой – прямолинейные участки, красный – криволинейные участки

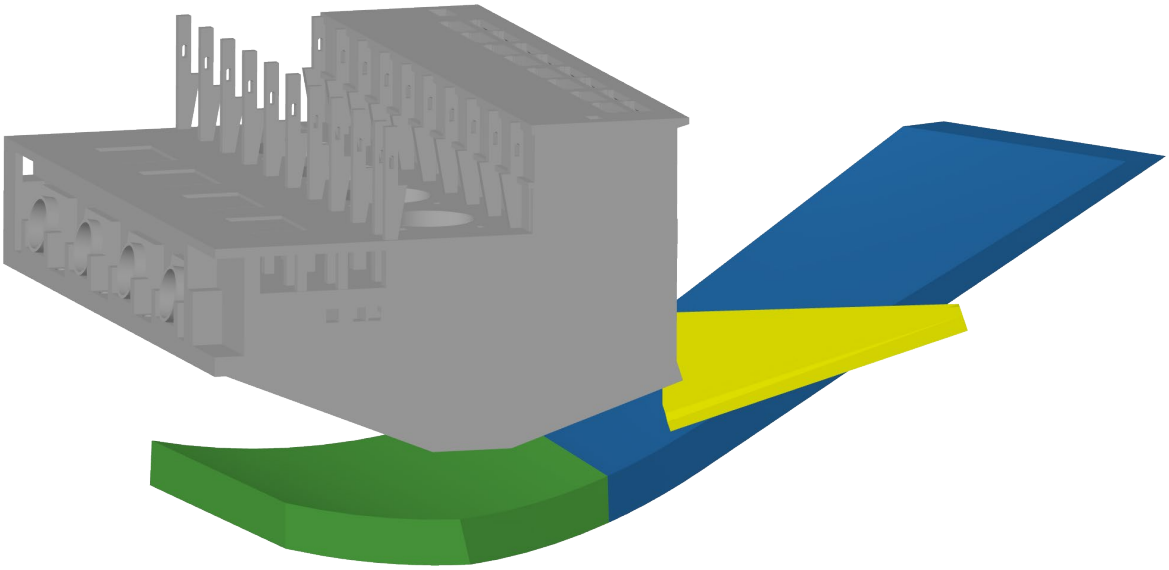


Рисунок 3.6.2. Пространственная компоновка зоны нагнетания и здания ГАЭС. Вид с юго-запада (со стороны водоводов и ПС-3). Объемная схема области размещения скважин ярусов с 8-го (нижнего) по 1-й (верхний): синий – область трассы скважин, зеленый – область осуществления инъекций компенсационного нагнетания

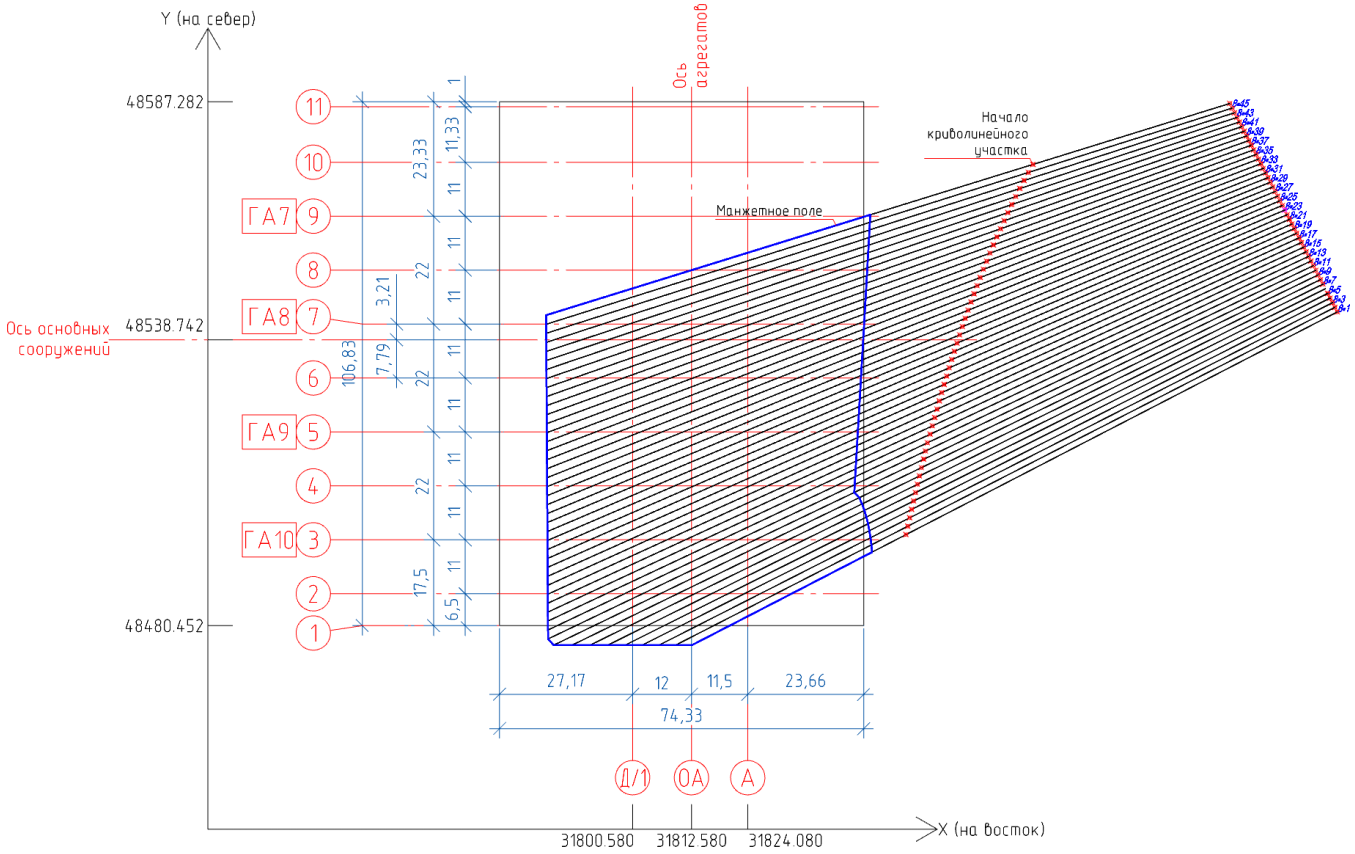


Рисунок 3.6.3. Схематичный план скважин (всего 8 ярусов, нумерация снизу вверх, на четных ярусах 46 скважин, на нечетных ярусах 45 скважин)

4. Анализ результатов фактически выполненных инъекционных работ

Проектное распределение объемов инъектирования медленнотвердеющего компенсационного раствора принято по данным [2.18].

Фактическое распределение объемов инъектирования на ярусах 8, 7, 6, 5, 4 принято по данным, преданным Заказчиком в электронном виде.

Начиная с яруса 4 учет объемов инъекций организован в цифровой форме на основе электронных протоколов инъекций, формируемых компьютерами насосных. Указанные протоколы содержат электронную запись для каждой инъекции с регистрацией ее объема, а также точного времени выполнения инъекции и технологических параметров.

По заданию Заказчика к фактическим объемам применен поправочный коэффициент 0,88 на погрешность расходомеров.

Сопоставление проектных и фактических объемов инъектирования на ярусах с 8 по 4 приведено в графическом и табличном виде (рисунки 4.1–4.36, таблицы 4.1–4.2). Рисунки выполнены в псевдографическом стиле и представляют собой матрицу ячеек, ориентированную по сторонам, где 45 или 46 строк соответствуют номерам манжетных колонн, 140 столбцов соответствует номерам манжет, цвет ячейки соответствует объему нагнетания согласно шкале. Размерность на рисунках в псевдографическом стиле – литры на манжету.

В процессе компенсационного нагнетания неоднократно изменялись как технологические особенности проведения инъекций, так и методика их документирования. Прежде всего, это связано с применением как двухстороннего пакера, когда нагнетания выполняются в отдельных манжеты, так одностороннего пакера, когда нагнетания выполняются кустовым способом единовременно в группу по 5 манжет. В случае кустовой инъекции в отчетных материалах нагнетание указывается в одну манжету в пятикратном объеме. Это затрудняет сопоставление проектных и фактических данных.

В ходе научно-технического сопровождения работ по компенсационному нагнетанию отработан следующий подход к обобщению данных о выполненных инъекциях. Вначале данные собираются так, как они задокументированы. При наличии сведений о кустовой инъекции, ее объем равномерно распределяется на манжеты в составе куста, а если данных о кусте нет, то объемы фиксируются в тех манжетах, к которым они отнесены в документации. Далее все объемы осредняются, независимо от того, как проводились инъекции, раздельно в каждую манжету или кустовым способом.

Использовано для способа осреднения: блочное и кустовое, что можно рассматривать как осреднение на большом и малом масштабе.

При блочном осреднении манжетное поле разделено 30 участков по номерам манжетных колонн и манжет. В блок входит 252–280 манжет. В этом случае, блоки назначены формально на основе нумерации, поэтому полученные блоки не имеют самостоятельного геотехнического значения.

При кустовом осреднении находится среднее арифметическое в кустах, т.е. в группах по 5 манжет (куст представляет собой участок манжетной колонны длинной 5·0,5 = 2,5 м). Данный способ группировки имеет четкий геотехнический смысл. Схема подразделения манжетных колонн на кусты принята единой, соответствующей актуальной схеме для инъекций на 3 ярусе. Поскольку в рассматриваемом контексте группировка манжет по кустам используется только для осреднения результатов, возможные отличия принятой на 3 ярусе схемы кустов от использованной на предыдущей ярусах не имеет существенного значения для анализа.

Для каждого яруса манжетных колонн, а также суммарно для ярусов 8, 7, 6, 5, 4 представлены следующие данные:

- распределение проектных объемов инъектирования в литрах на манжету;
- распределение фактических объемов инъектирования в литрах на манжету (с учетом поправочного коэффициента на погрешность расходомеров, как указано выше);
- распределение фактических объемов с блочным осреднением;
- распределение фактических объемов с кустовым осреднением;
- разность между фактическими и проектными объемами в литрах на манжету с блочным осреднением;
- разность между фактическими и проектными объемами в литрах на манжету с кустовым осреднением.

Скважины нечетного яруса в плане располагаются между скважинами четного яруса. Расчет суммарного распределения выполнен следующем образом: по половине объема от каждой манжеты нечетного яруса прибавлено к объемам двух манжет с таким же номером на смежных скважинах четного яруса. Полученные данные сведены в таблицу размером 46 строк (по числу манжетных колонн четного яруса) и 140 столбцов (по числу манжет обоих ярусов).

Анализ рисунков 4.1–4.36 показывает, что фактическое распределение, по сравнению с проектным, характеризуется местной, зональной и общей неравномерностью.

Местная неравномерность в основном обусловлена применением кустового метода инъектирования при помощи одностороннего пакера с длиной куста 5 манжет. Указанная неравномерность носит регулярный характер и можно полагать, что не оказывает существенного влияния на подъем здания ГАЭС (при этом следует раз-

личать влияние местной неравномерности, возникающей при использовании кустового метода инъектирования с односторонним пакером, и эффективность манжетной технологии с односторонним пакером в целом, которая зависит от разных аспектов, в частности, от однонаправленной последовательности нагнетания от забоя к устью). В целях анализа местная неравномерность сглаживается с помощью осреднения данных по блокам и по кустам.

Зональная неравномерность обусловлена отклонением фактического хода инъекционных работ от проекта, например, в связи с выходом из строя скважин или отказом манжет. По тем или иным объективным причинам возникновение зональной неравномерности представляется неизбежным. При этом зональная неравномерность, возникшая на определённом этапе компенсационного нагнетания, поддается компенсированию на текущем и последующих этапах путем перераспределения объемов инъектирования.

Задача управления зональной неравномерностью решается по ходу подготовки сменных заданий в рамках текущей оптимизации распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов за период с начала работ по компенсационному нагнетанию.

В частности, при выходе из строя отдельных манжетных колонн происходит перераспределение выпадающих инъекционных объемов на смежные манжетные колонны.

Общая неравномерность рассматривается в масштабе всего манжетного поля и определяет воздействие компенсационного нагнетания на неравномерный управляемый подъем здания ГАЭС в целом. Задачей подготовки сменных заданий является обеспечение требуемого общего воздействия на здание несмотря на проявления местной и зональной неравномерности.

В ходе настоящей и предшествующих работ по научно-техническому сопряжению компенсационного нагнетания можно отметить, что характер общей неравномерности распределения инъекционных объёма по манжетному полю меняется по сравнению с первоначальным проектом, благодаря учету фактического подъема и фактического распределения инъекционных объёмов, что было изначально предусмотрено указаниями рабочей документации [2.18].

Фактические распределения по ярусам 8, 7, 6, 5, 4 (рисунки 4.2, 4.8, 4.14 и 4.20 4.26, соответственно) являются начальными условиями (предыдущим этапами в рамках поэтапного геотехнического расчета) для настоящей работы по оптимизации распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания на ярусе 3 манжетных колонн.

В общей сложности на ярусах 8, 7, 6, 5, 4 было инъецировано 120 % объема компенсационного раствора от предусмотрено проектом на рассматриваемых ярусах, или 75 % от полного проектного объема для всех восьми ярусов, равного 17,1 млн. л.

Из таблицы 4.2 следует, что по мере практической отработки уникальной технологии крупномасштабного компенсационного нагнетания отношение фактического объема компенсационного раствора к проектному возросло: от 80–83 % на ярусах 7–8, до 146–173 % на ярусах 4–5. Таким образом с учетом планируемых ярусов 2 и 1 предусмотренная проектом система манжетных колонн имеет потенциальную возможность обеспечить, при необходимости, инъектирование компенсационного раствора в объеме приблизительно в 1,4 и более раз свыше проектного, т.е. суммарно порядка 24 млн. л. и выше.

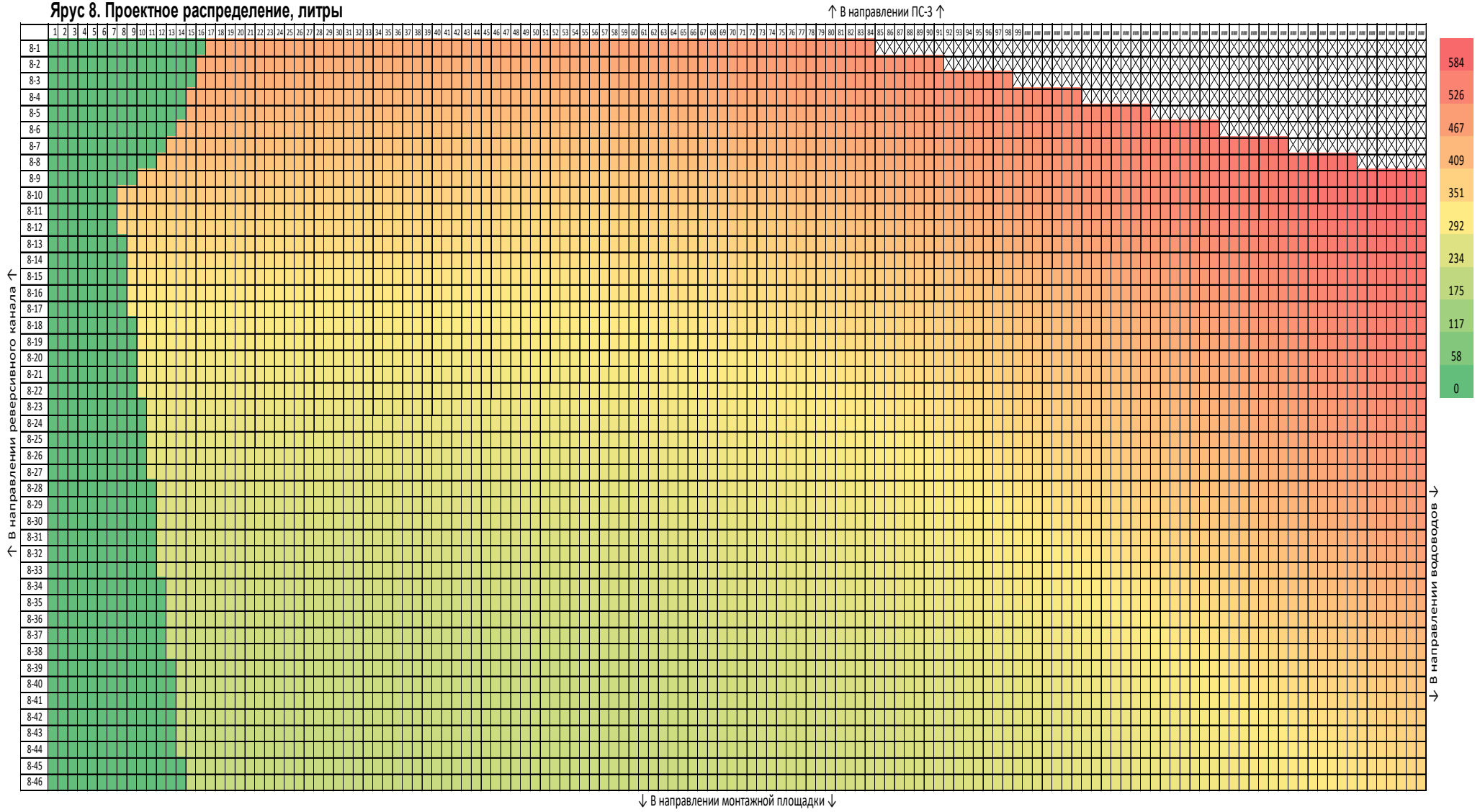

Ярус 8. Проектное распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
584
526
467
409
351
292
234
175
117
58
0

Рисунок 4.1.


Ярус 8. Фактическое распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
3100
2790
2480
2170
1860
1550
1240
930
620
310
0

Рисунок 4.2.

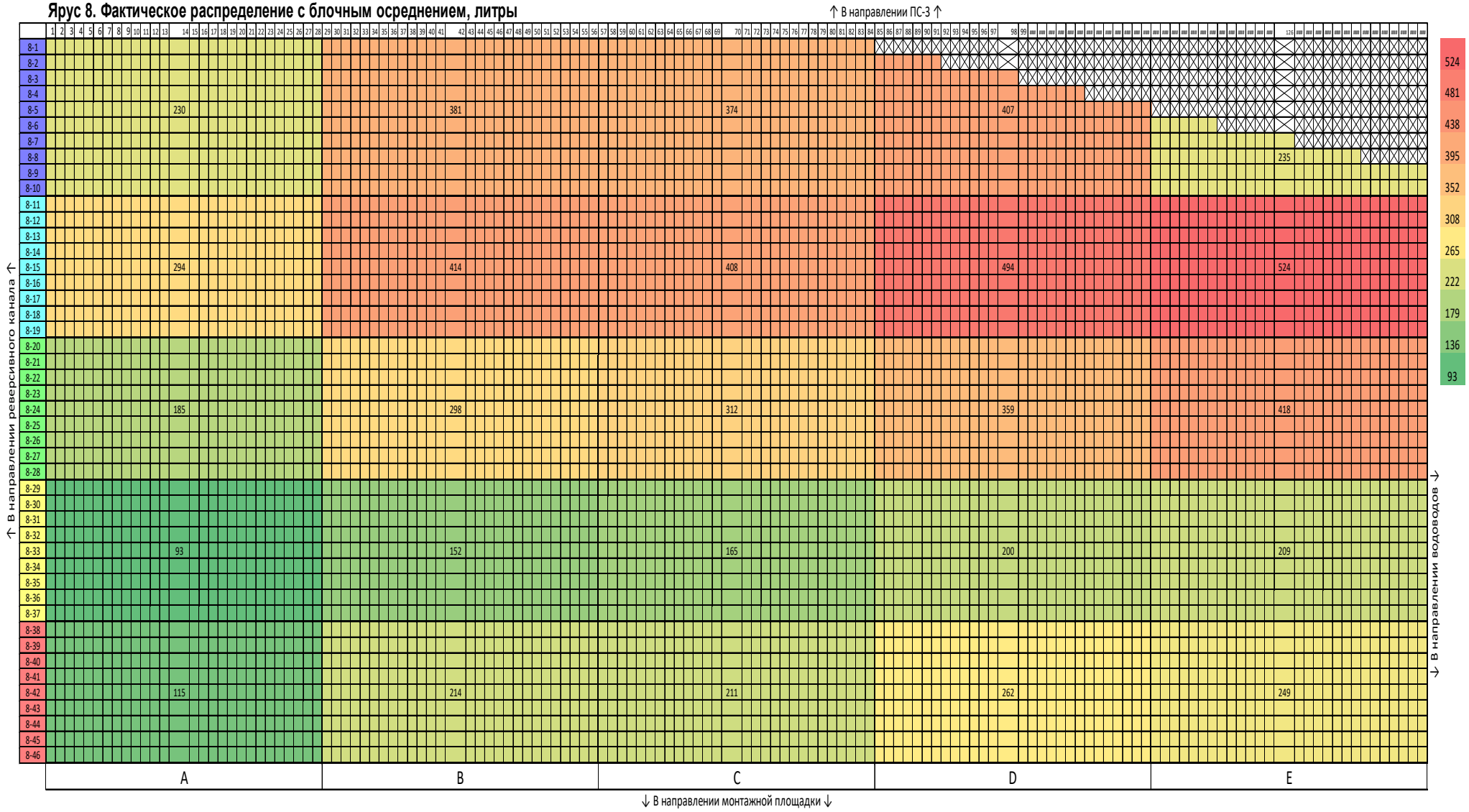

Ярус 8. Фактическое распределение с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
230
381
374
407
235
294
414
408
494
524
185
298
312
359
418
93
152
165
200
209
115
214
211
262
249
524
481
438
395
352
308
265
222
179
136
93

Рисунок 4.3.

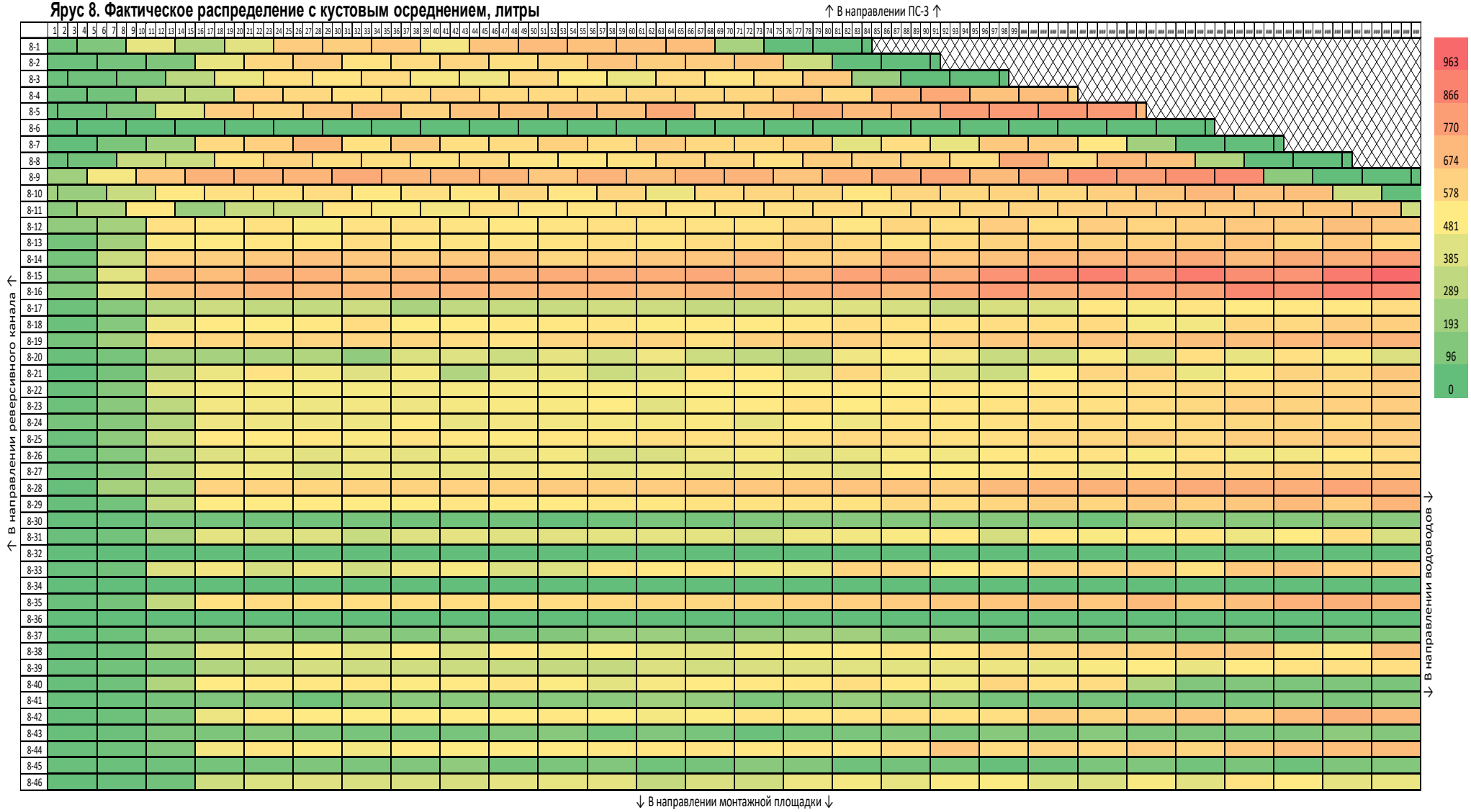

Ярус 8. Фактическое распределение с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
963
866
770
674
578
481
385
289
193
96
0

Рисунок 4.4.


Ярус 8. Разность факт - план с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
-16
-63
-92
-98
-319
21
33
7
42
-6
-23
-27
-37
-43
-65
-67
-122
-134
-153
-226
-15
-33
-54
-46
-131
42
6
-30
-66
-102
-139
-175
-211
-247
-283
-319

Рисунок 4.5.


Ярус 8. Разность факт - план с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
403
304
205
107
8
-91
-189
-288
-387
-485
-584

Рисунок 4.6.

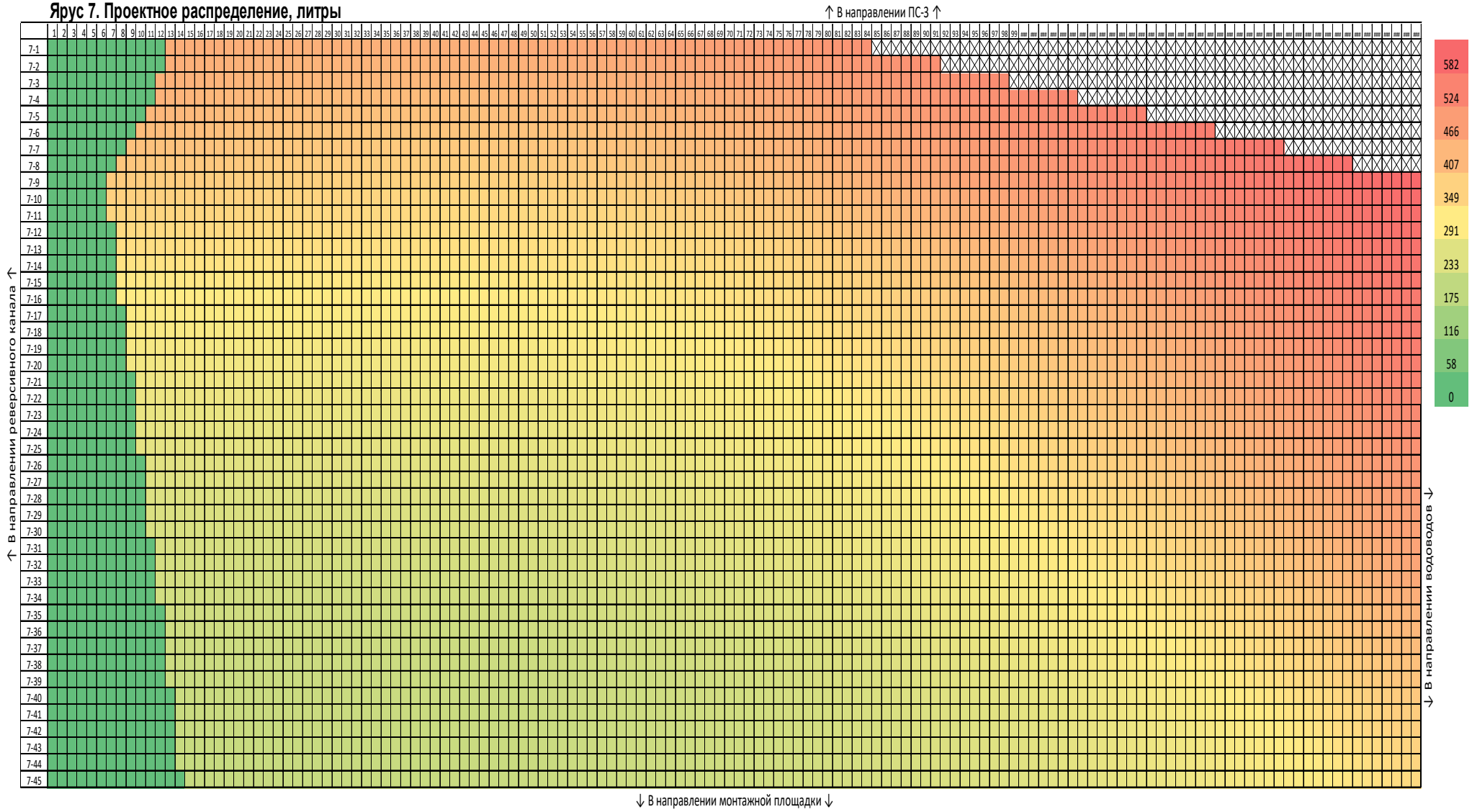

Ярус 7. Проектное распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
582
524
466
407
349
291
233
175
116
58
0

Рисунок 4.7.


Ярус 7. Фактическое распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
4914
4423
3931
3440
2949
2457
1966
1474
983
491
0

Рисунок 4.8.

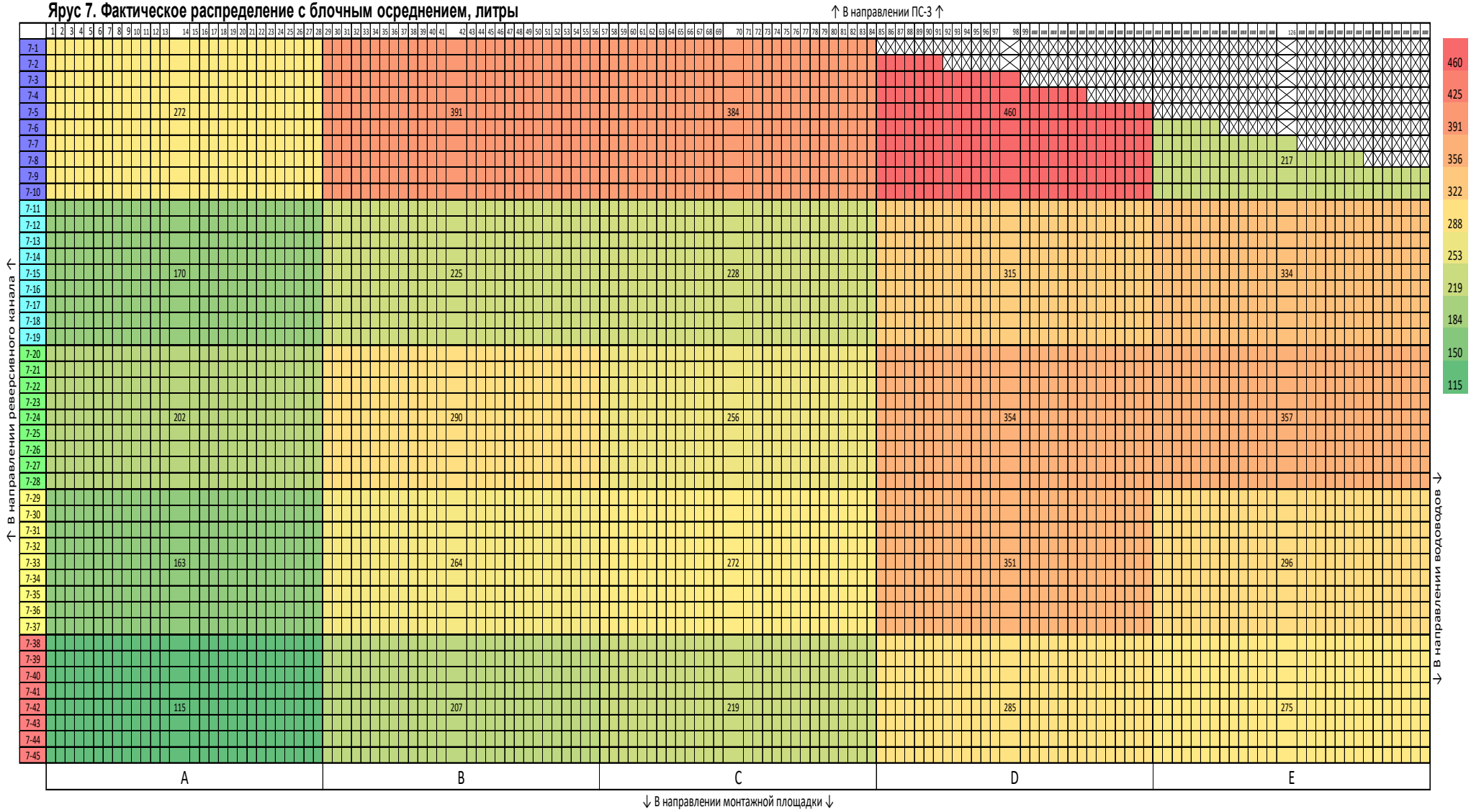

Ярус 7. Фактическое распределение с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
272
391
384
460
217
170
225
228
315
334
202
290
256
354
357
163
264
272
351
296
115
207
219
285
275
460
425
391
356
322
288
253
219
184
150
115

Рисунок 4.9.

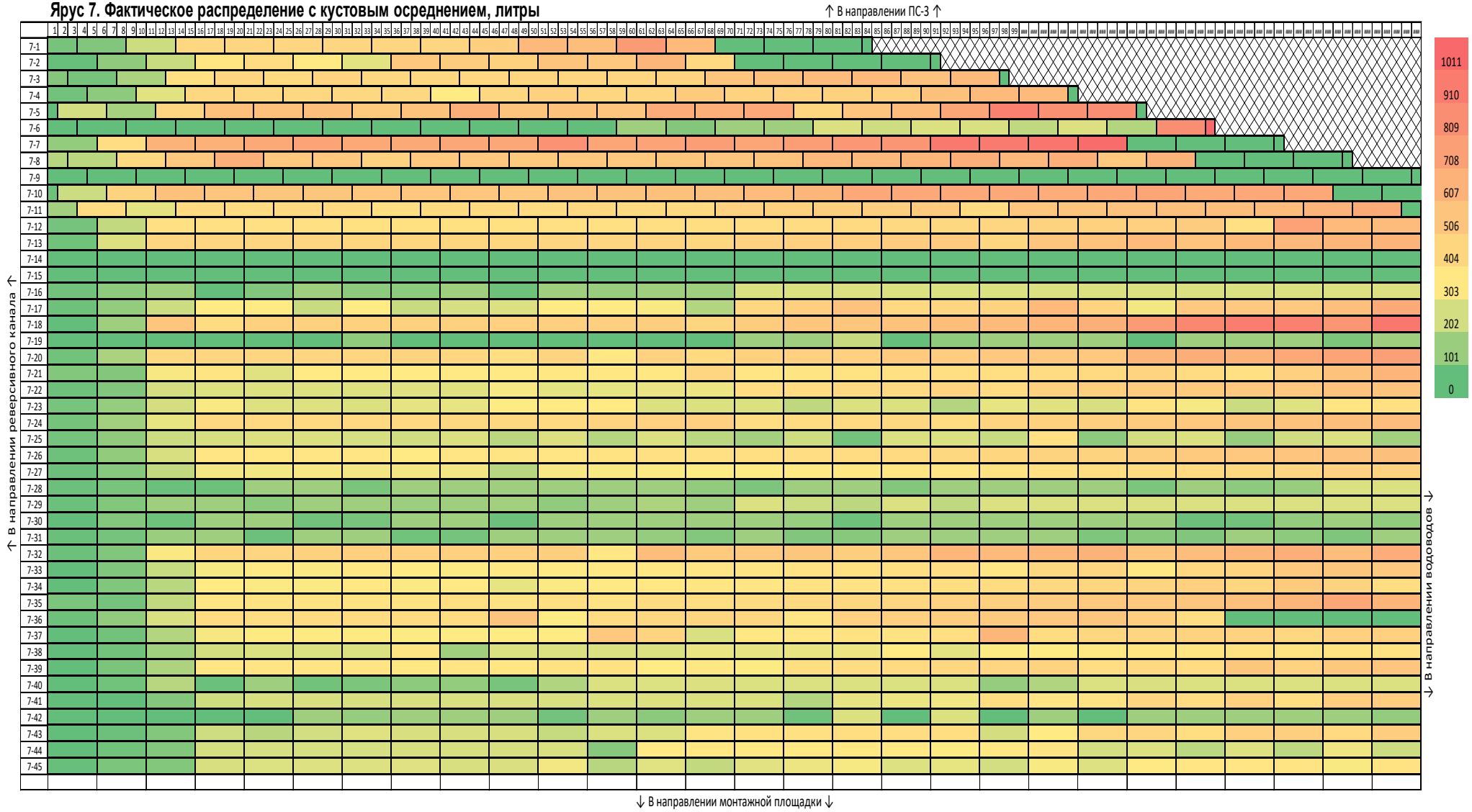

Ярус 7. Фактическое распределение с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99
7-1 7-2 7-3 7-4 7-5 7-6 7-7 7-8 7-9 7-10 7-11 7-12 7-13 7-14 7-15 7-16 7-17 7-18 7-19 7-20 7-21 7-22 7-23 7-24 7-25 7-26 7-27 7-28 7-29 7-30 7-31 7-32 7-33 7-34 7-35 7-36 7-37 7-38 7-39 7-40 7-41 7-42 7-43 7-44 7-45
1011
910
809
708
607
506
404
303
202
101
0
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓

Рисунок 4.10.

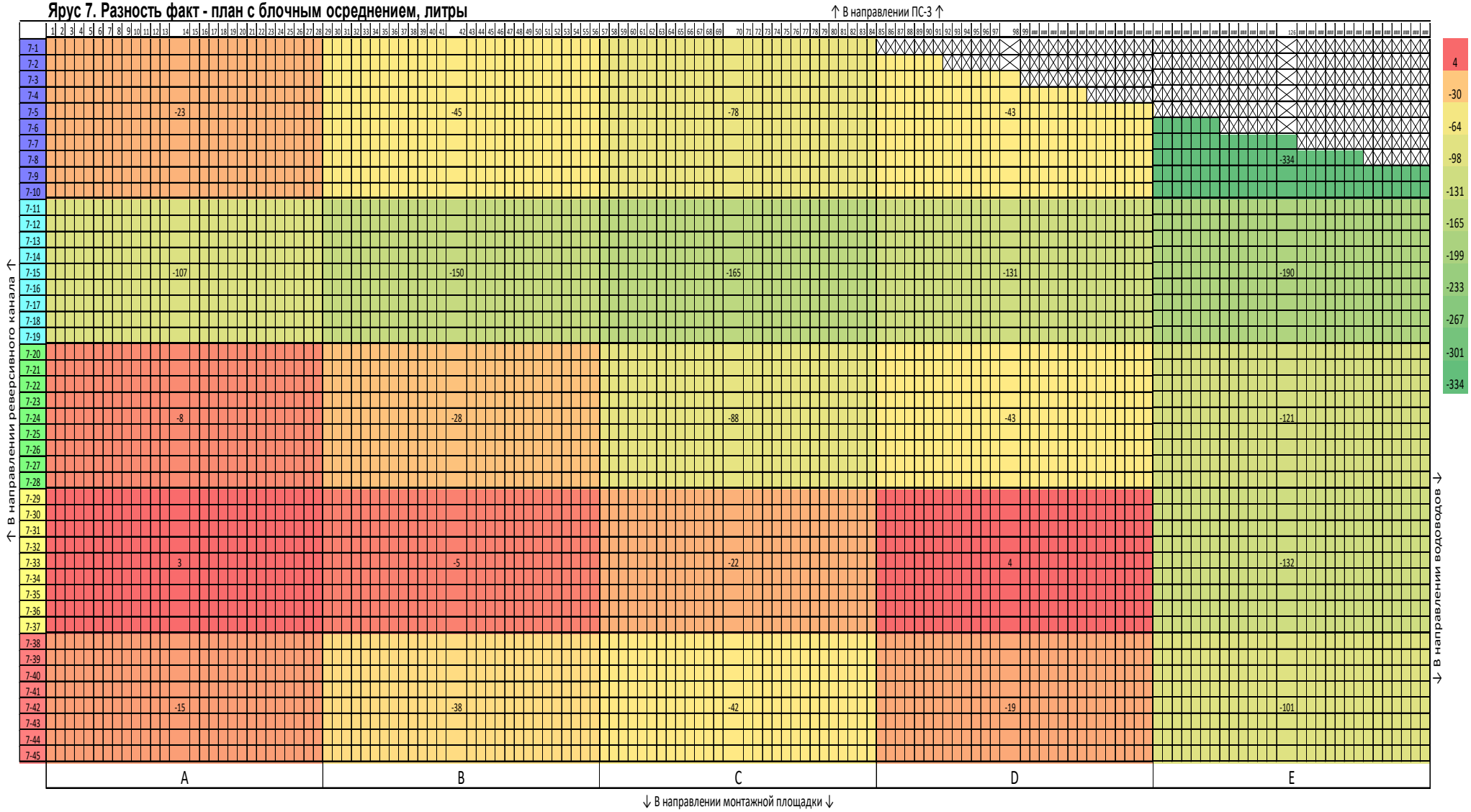

Ярус 7. Разность факт - план с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
-23
-45
-78
-43
-334
-107
-150
-165
-131
-190
-8
-28
-88
-43
-121
3
-5
-22
4
-132
-15
-38
-42
-19
-101
4
-30
-64
-98
-131
-165
-199
-233
-267
-301
-334

Рисунок 4.11.

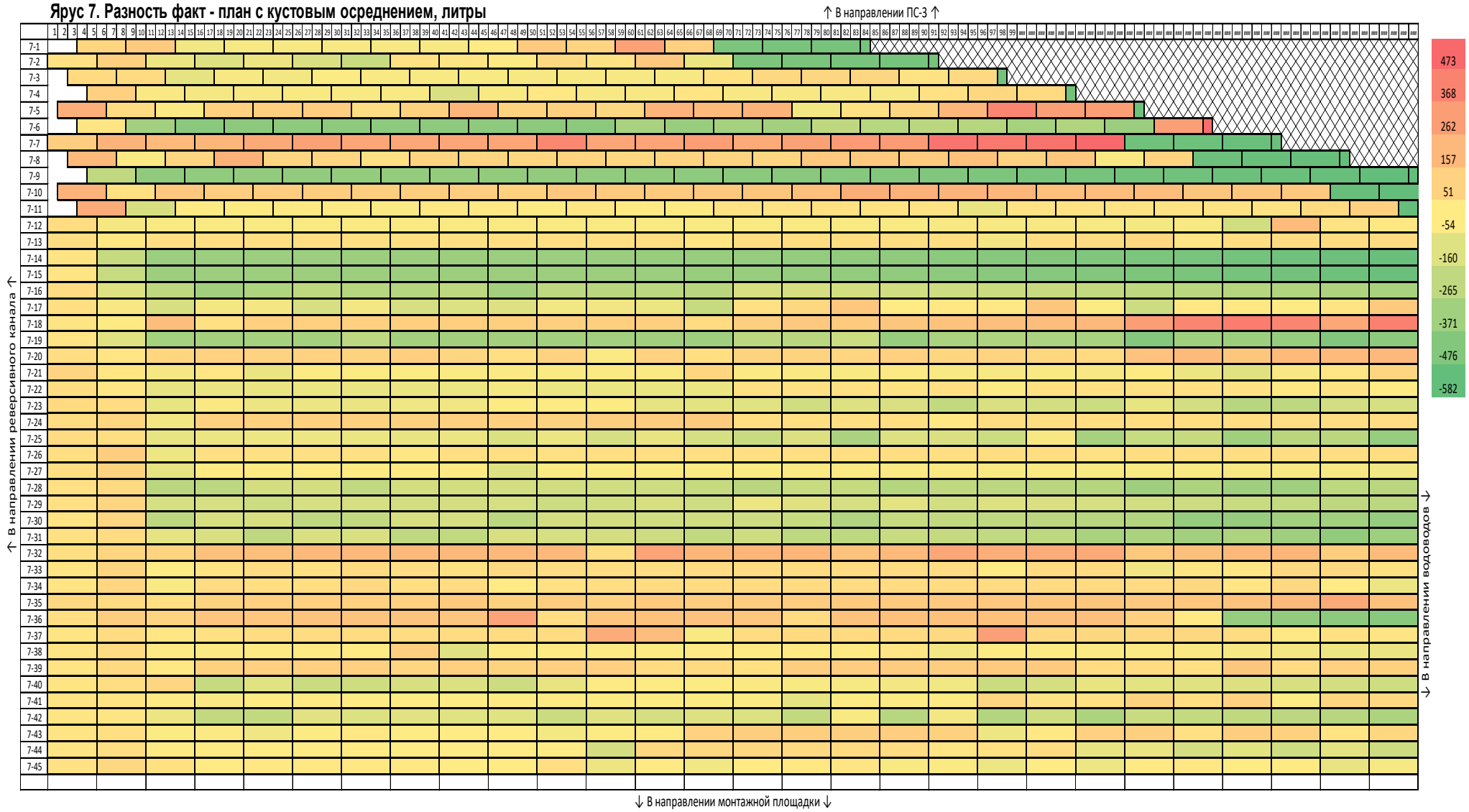

Ярус 7. Разность факт - план с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
473
368
262
157
51
-54
-160
-265
-371
-476
-582
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓

Рисунок 4.12.

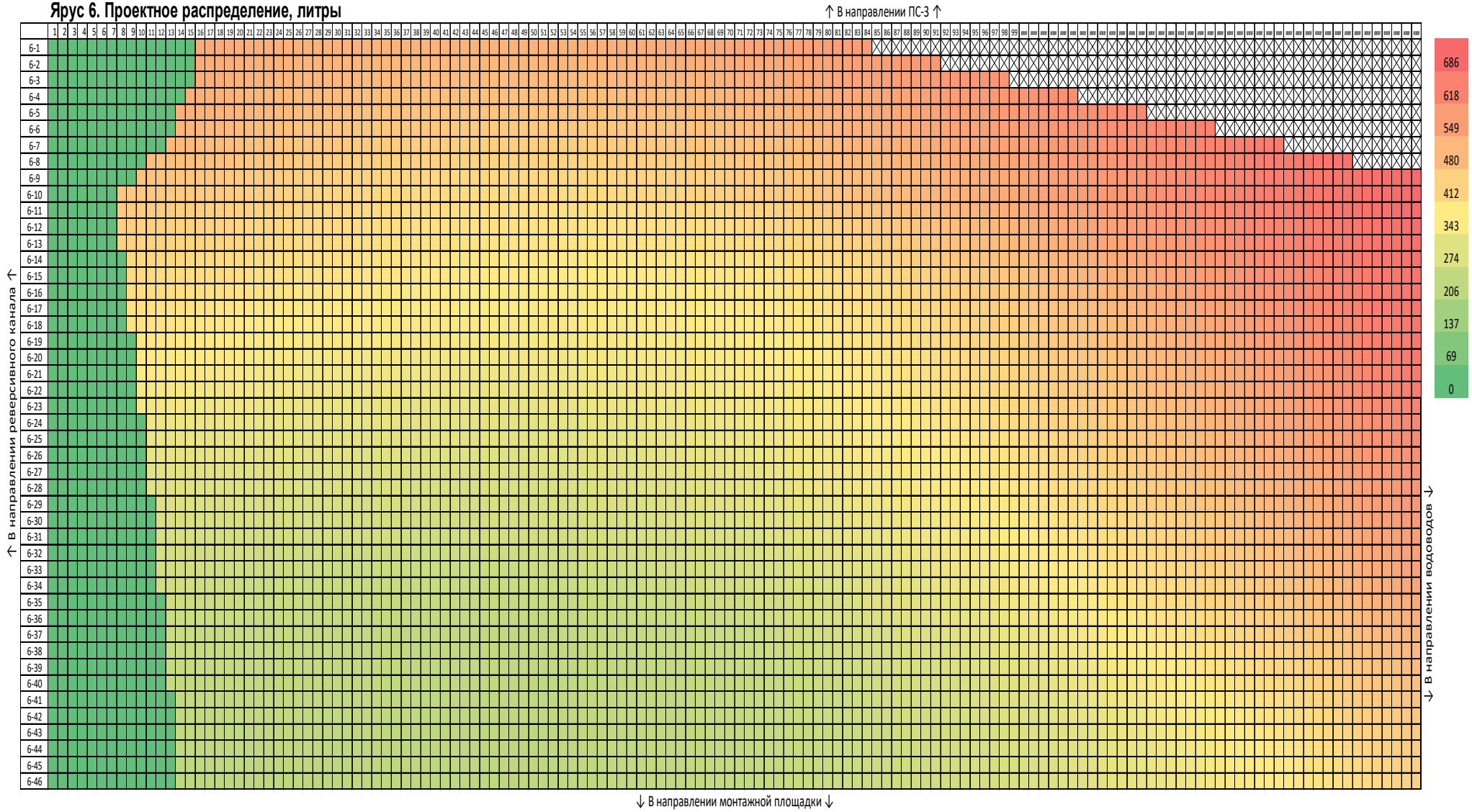

Ярус 6. Проектное распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
686
618
549
480
412
343
274
206
137
69
0

Рисунок 4.13.


Ярус 6. Фактическое распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
2530
2277
2024
1771
1518
1265
1012
759
506
253
0

Рисунок 4.14.

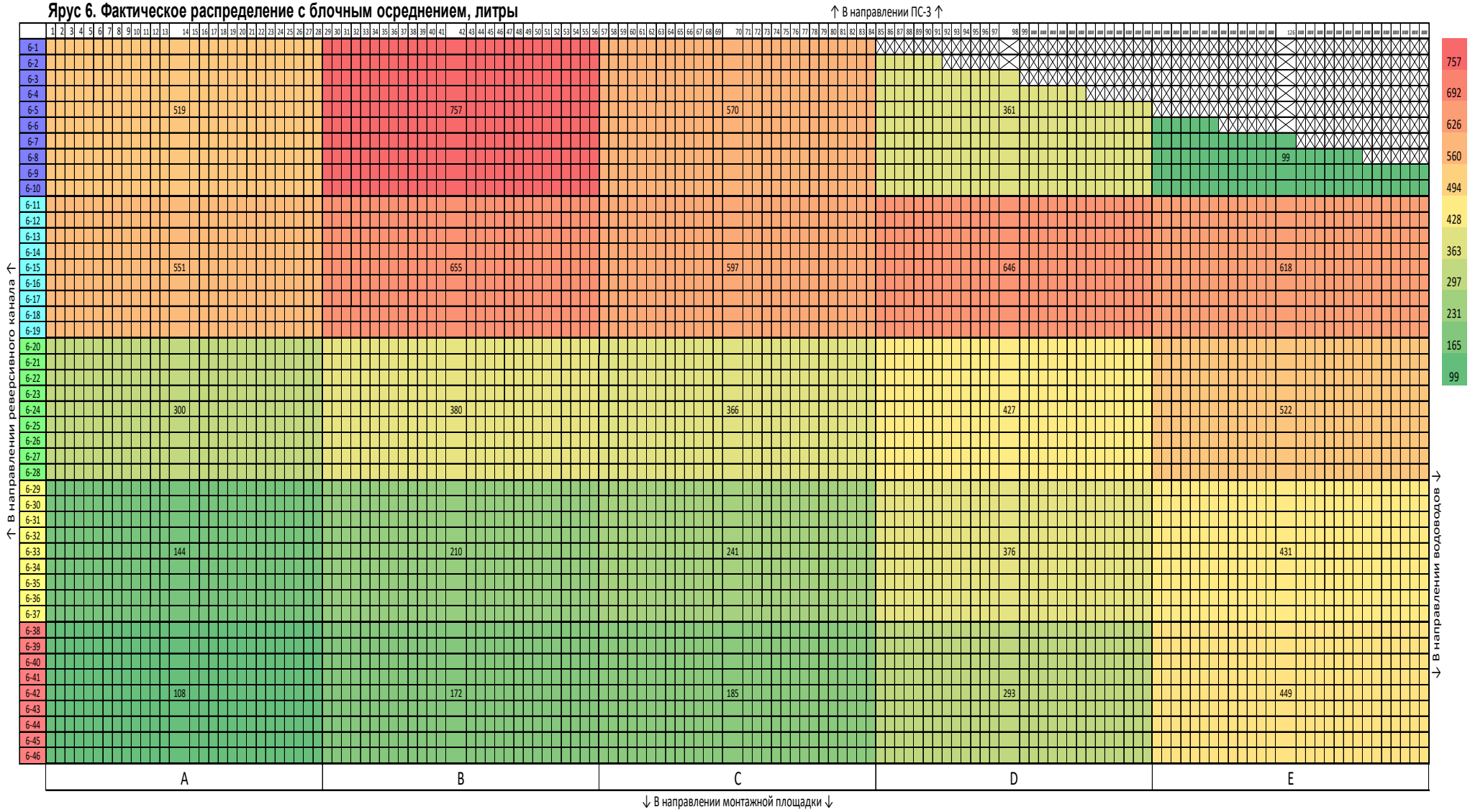

Ярус 6. Фактическое распределение с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
519
757
570
361
99
551
655
597
646
618
300
380
366
427
522
144
210
241
376
431
108
172
185
293
449
757
692
626
560
494
428
363
297
231
165
99

Рисунок 4.15.

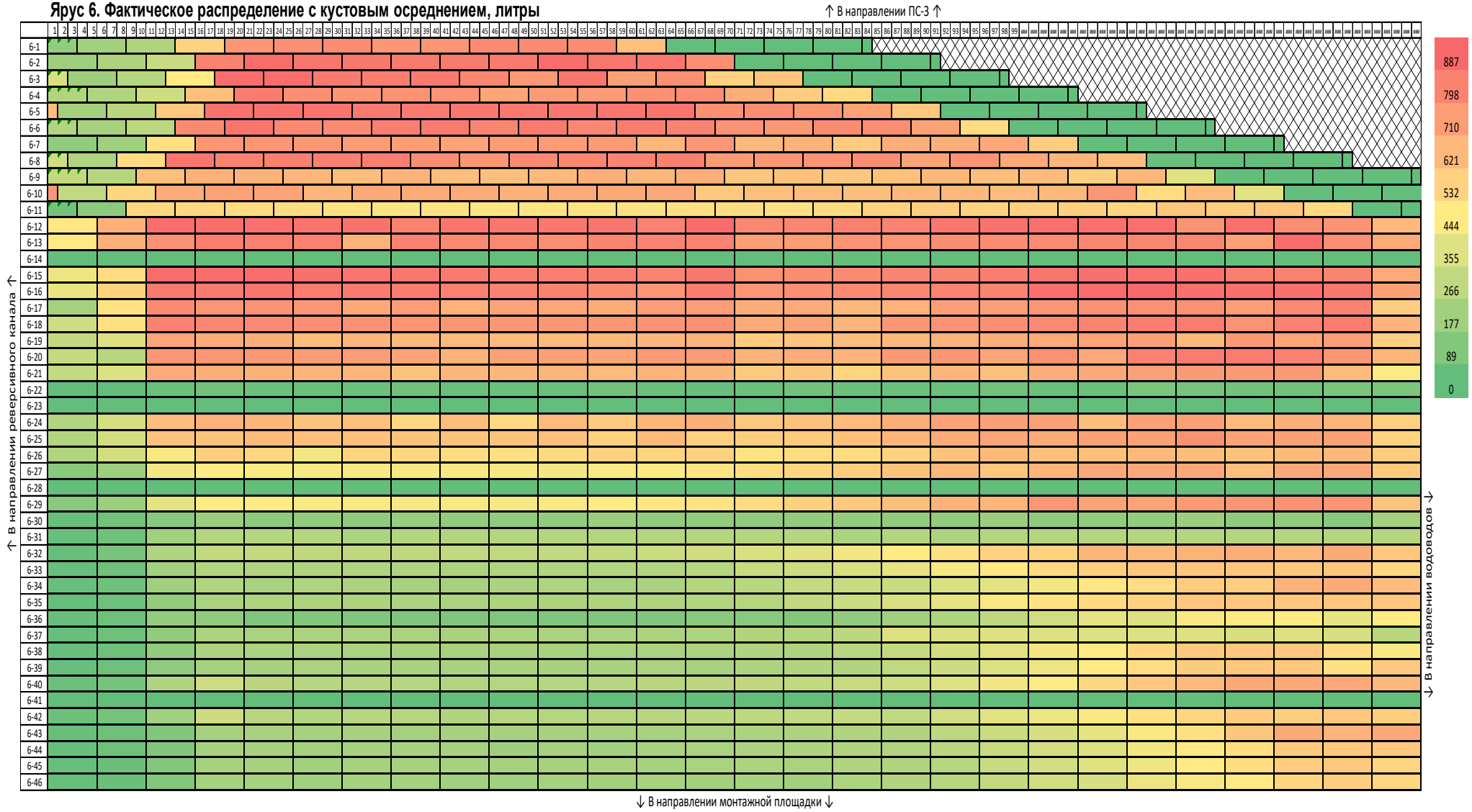

Ярус 6. Фактическое распределение с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99
6-1 6-2 6-3 6-4 6-5 6-6 6-7 6-8 6-9 6-10 6-11 6-12 6-13 6-14 6-15 6-16 6-17 6-18 6-19 6-20 6-21 6-22 6-23 6-24 6-25 6-26 6-27 6-28 6-29 6-30 6-31 6-32 6-33 6-34 6-35 6-36 6-37 6-38 6-39 6-40 6-41 6-42 6-43 6-44 6-45 6-46
887
798
710
621
532
444
355
266
177
89
0
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓

Рисунок 4.16.

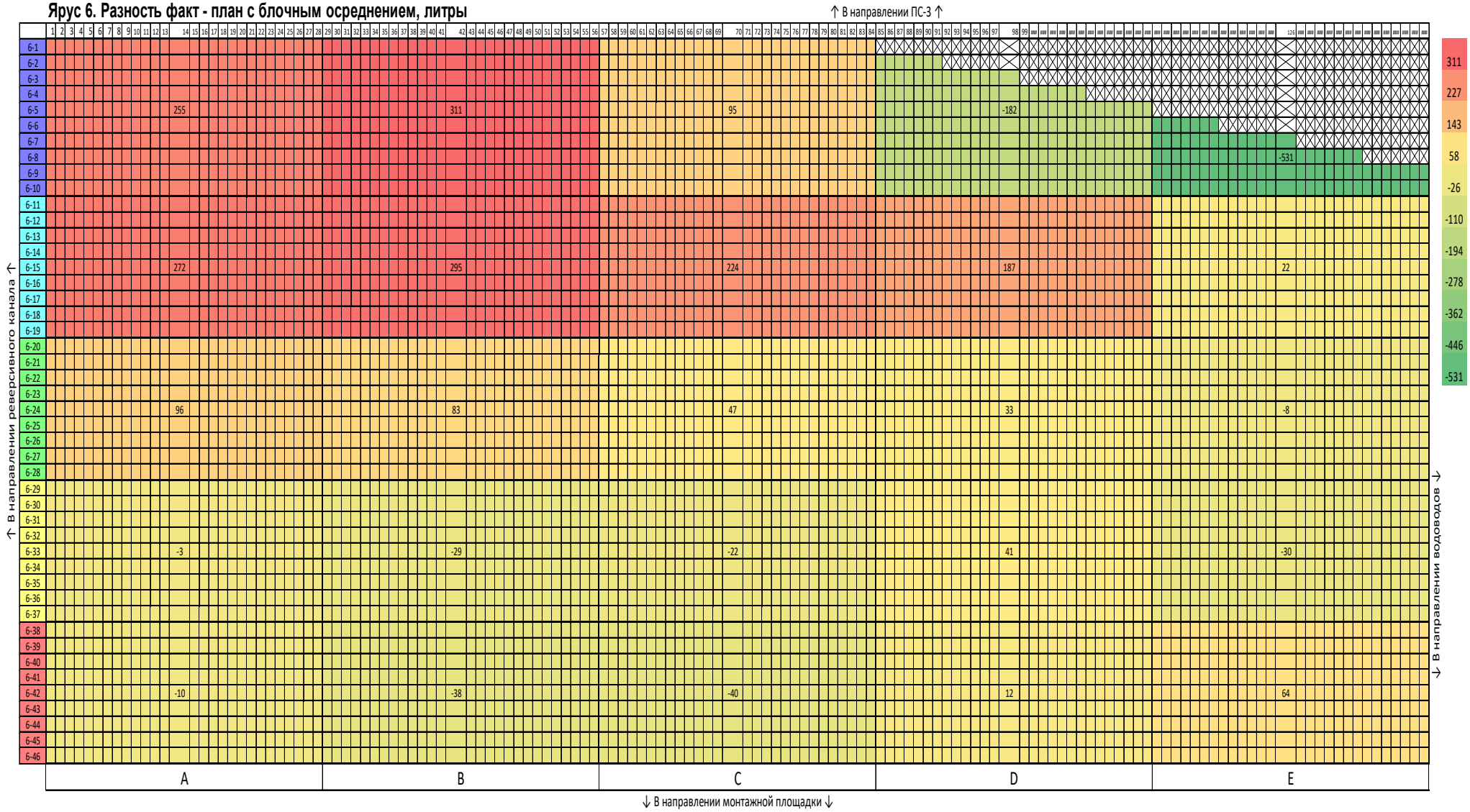

Ярус 6. Разность факт - план с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
255
311
95
-182
-531
272
295
224
187
22
96
83
47
33
-8
-3
-29
-22
41
-30
-10
-38
-40
12
64
311
227
143
58
-26
-110
-194
-278
-362
-446
-531

Рисунок 4.17.

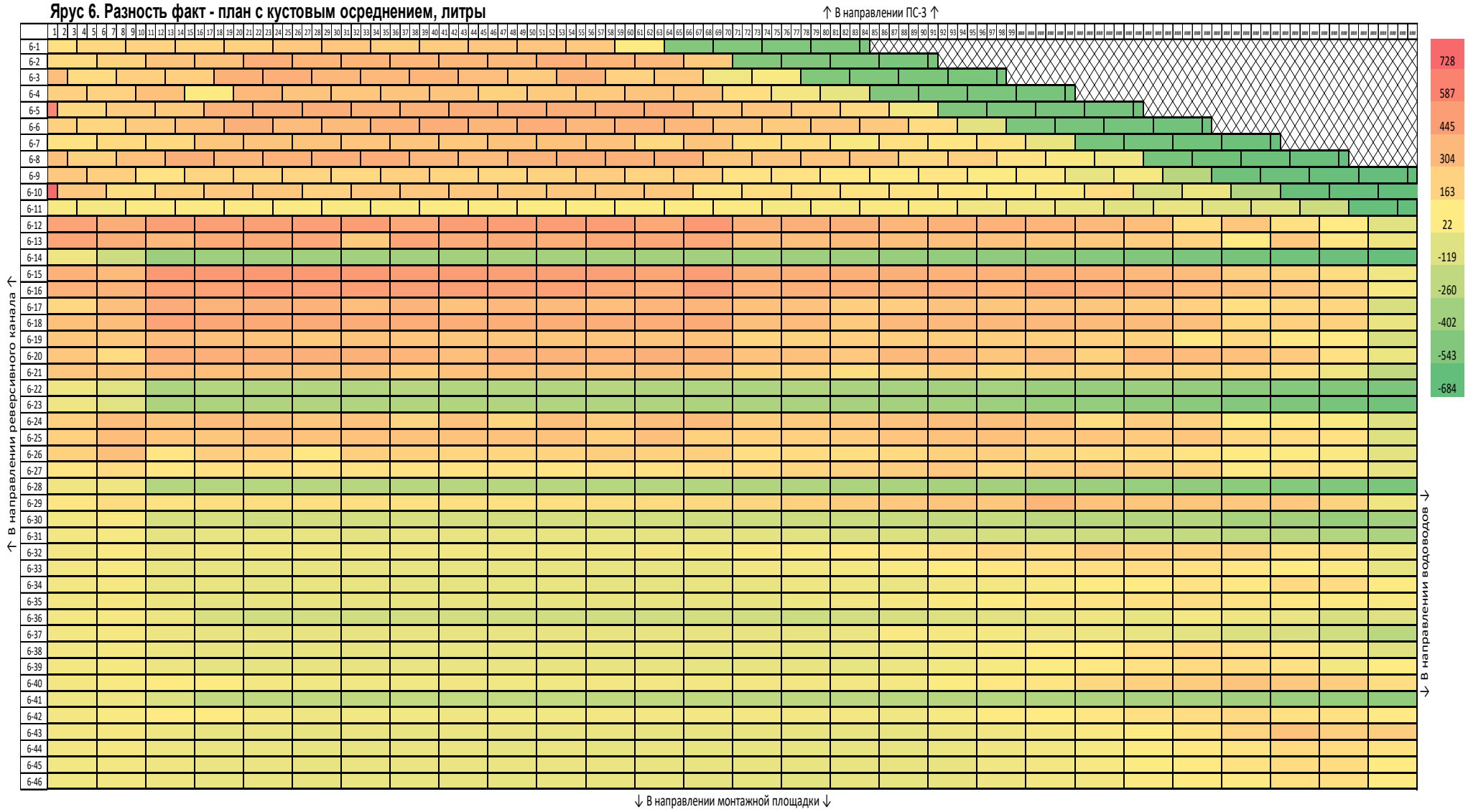

Ярус 6. Разность факт - план с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
728
587
445
304
163
22
-119
-260
-402
-543
-684

Рисунок 4.18.

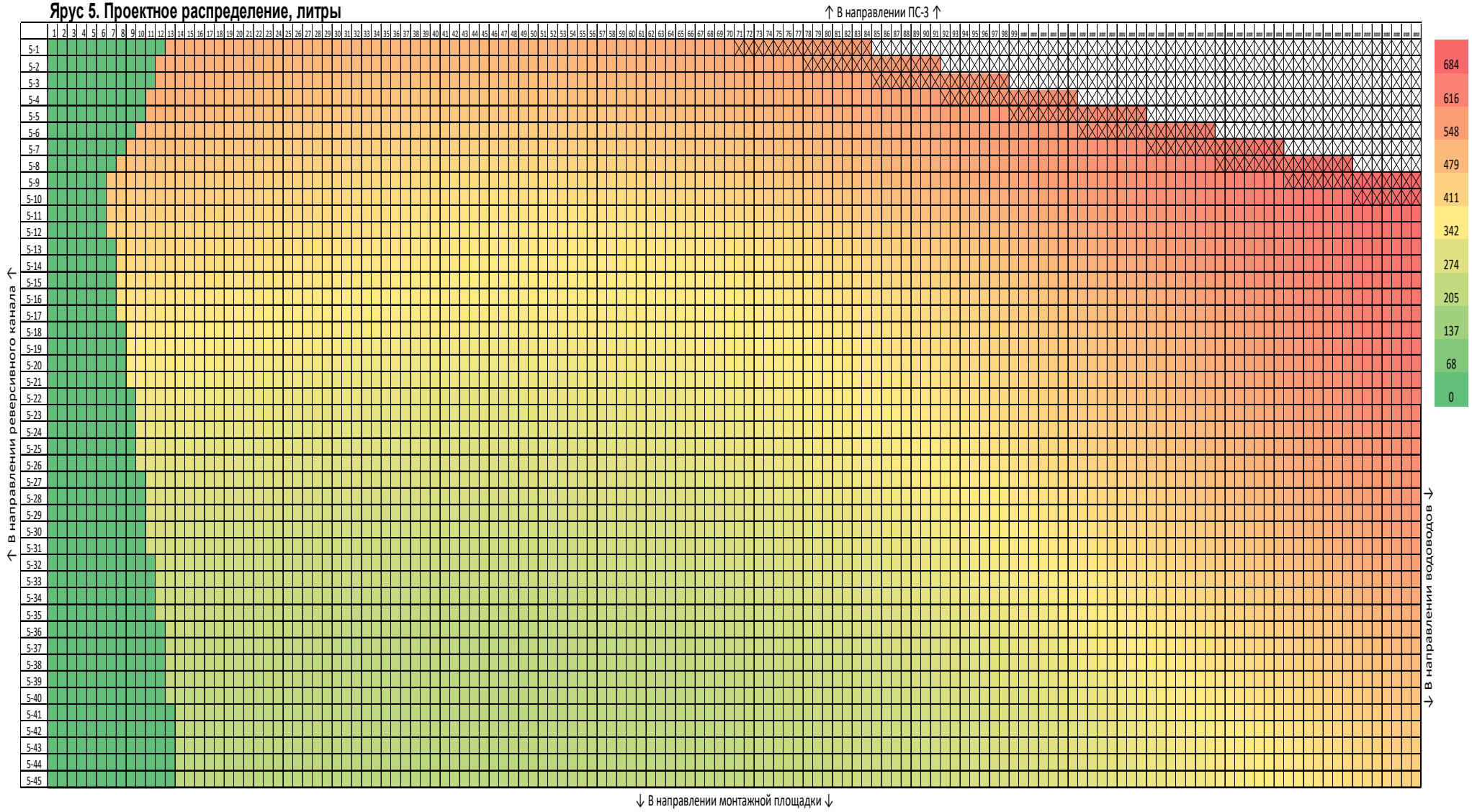

Ярус 5. Проектное распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
684
616
548
479
411
342
274
205
137
68
0

Рисунок 4.19.

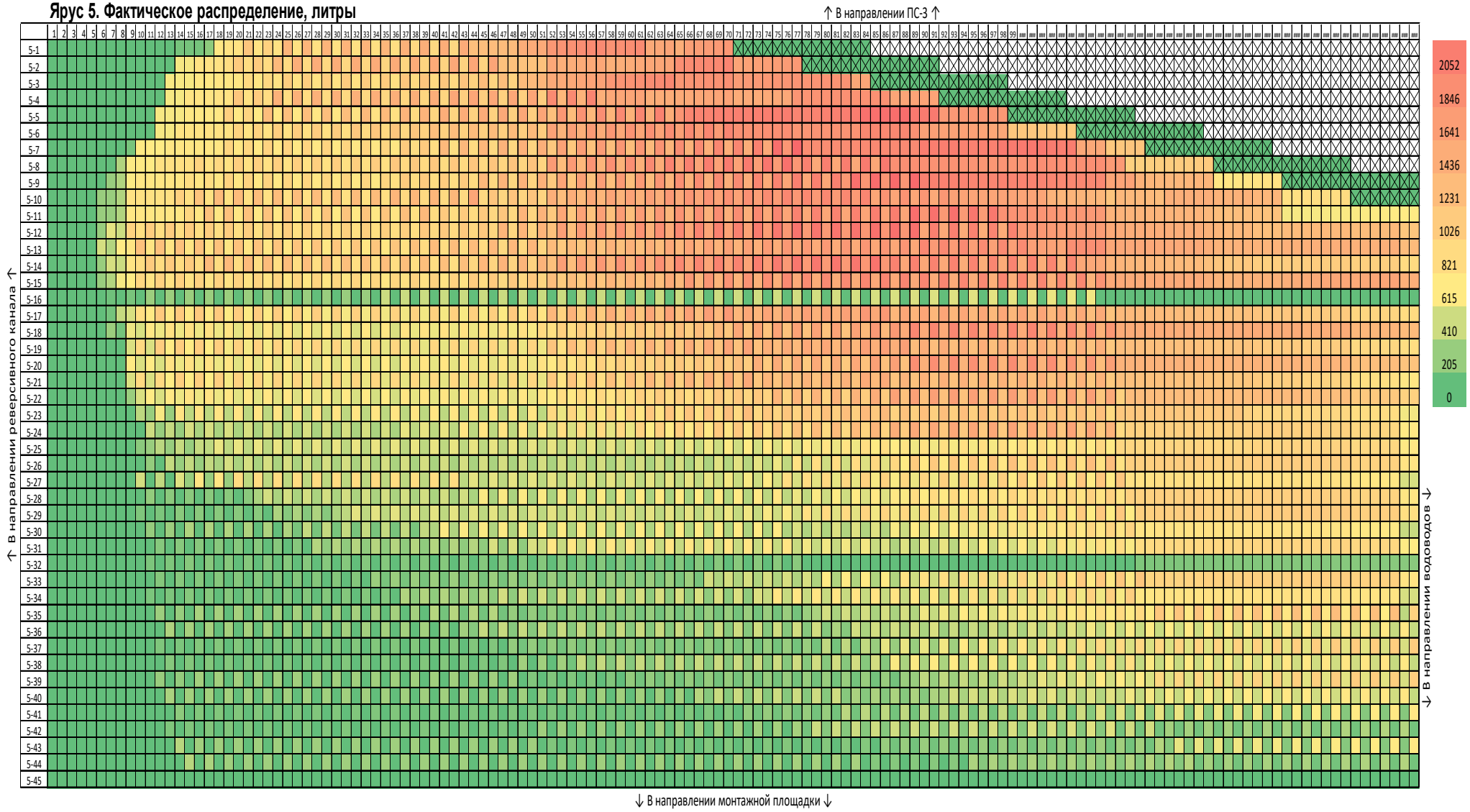

Ярус 5. Фактическое распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
2052
1846
1641
1436
1231
1026
821
615
410
205
0

Рисунок 4.20.

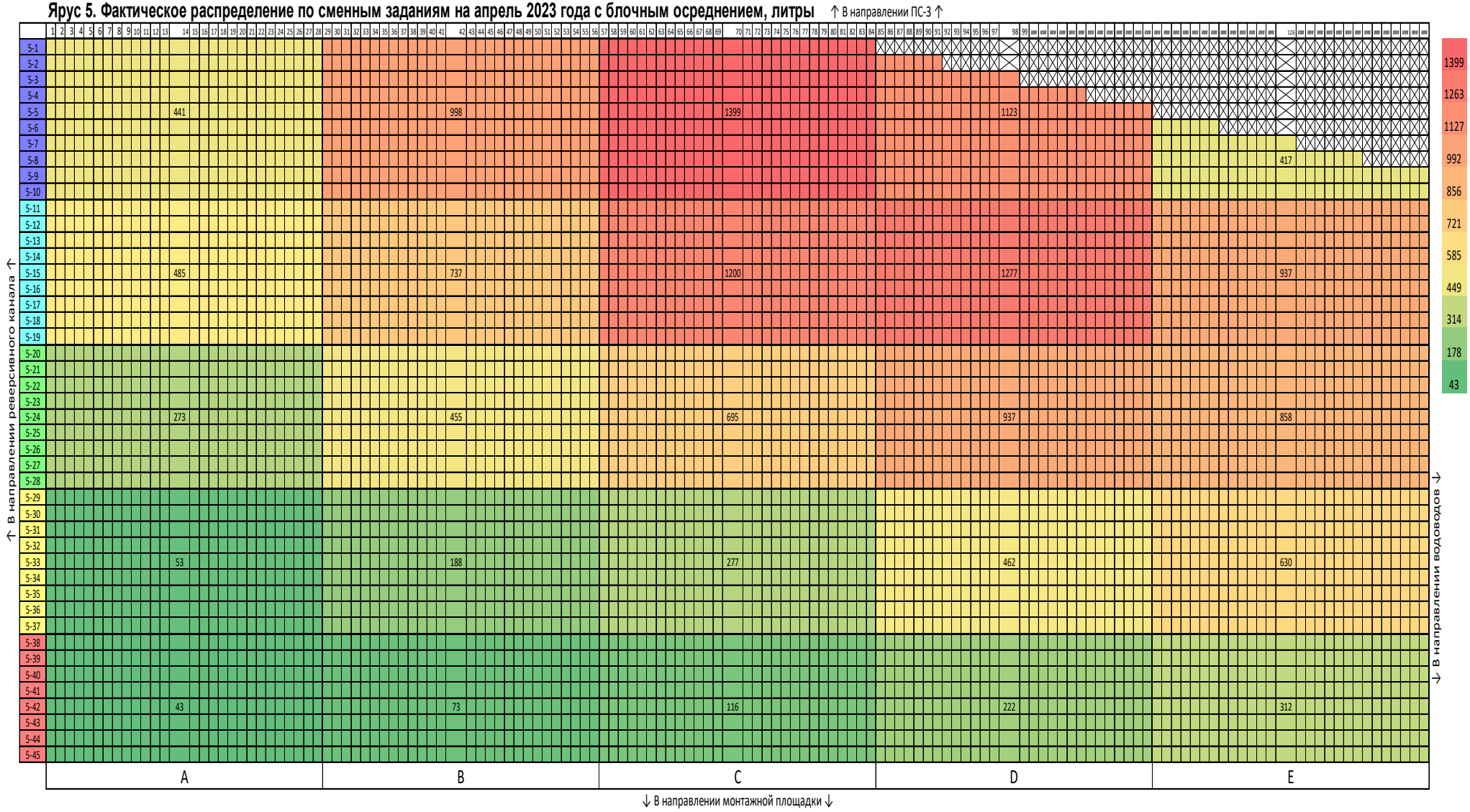

Ярус 5. Фактическое распределение по сменным заданиям на апрель 2023 года с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала →
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
441
998
1399
1123
417
485
737
1200
1277
937
273
455
695
937
858
53
188
277
462
630
43
73
116
222
312
1399
1263
1127
992
856
721
585
449
314
178
43

Рисунок 4.21.

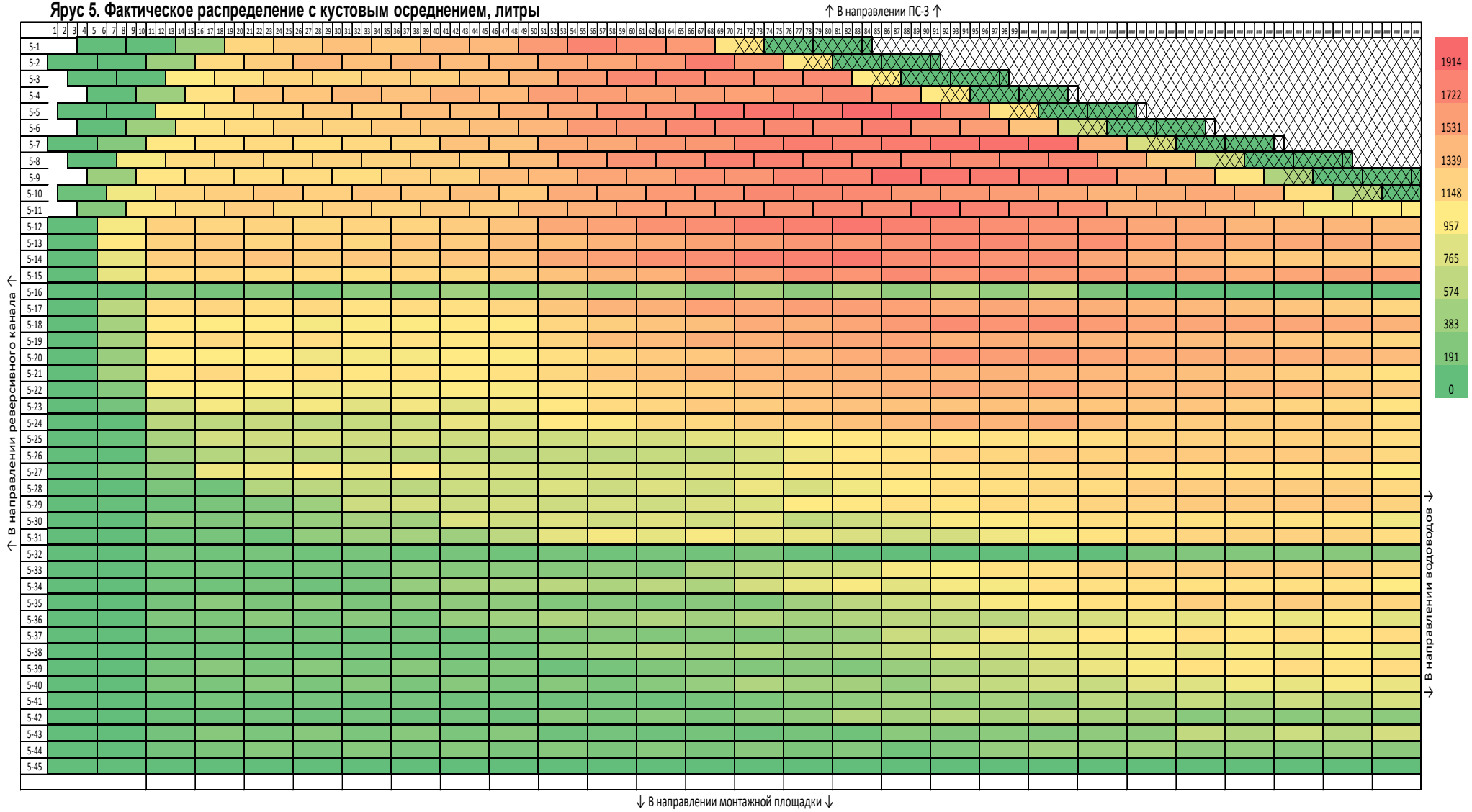

Ярус 5. Фактическое распределение с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
1914
1722
1531
1339
1148
957
765
574
383
191
0
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓

Рисунок 4.22.

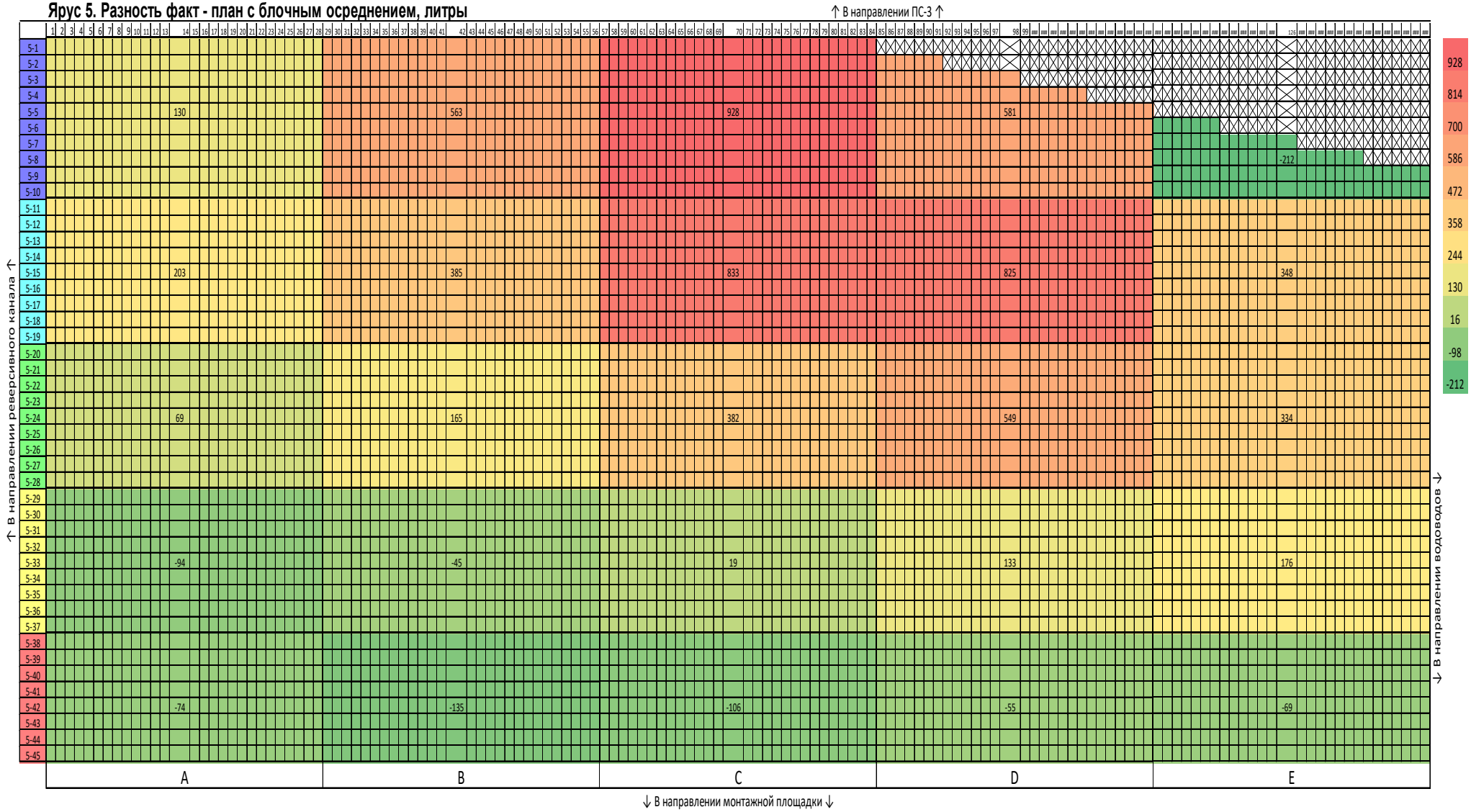

Ярус 5. Разность факт - план с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
130
563
928
581
-212
203
385
833
825
348
69
165
382
549
334
-94
-45
19
133
176
-74
-135
-106
-55
-69
928
814
700
586
472
358
244
130
16
-98
-212

Рисунок 4.23.

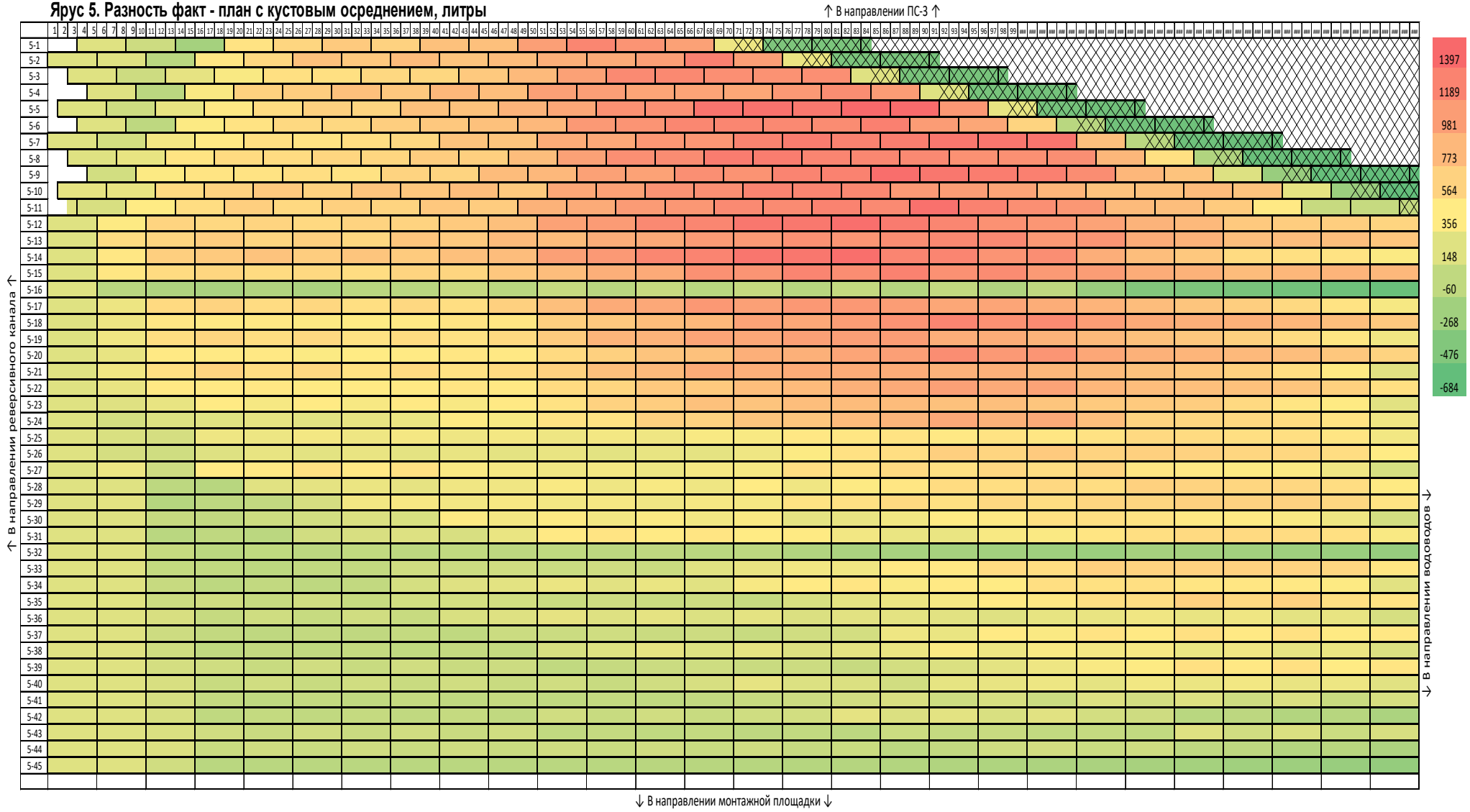

Ярус 5. Разность факт - план с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99
5-1
5-2
5-3
5-4
5-5
5-6
5-7
5-8
5-9
5-10
5-11
5-12
5-13
5-14
5-15
5-16
5-17
5-18
5-19
5-20
5-21
5-22
5-23
5-24
5-25
5-26
5-27
5-28
5-29
5-30
5-31
5-32
5-33
5-34
5-35
5-36
5-37
5-38
5-39
5-40
5-41
5-42
5-43
5-44
5-45
1397
1189
981
773
564
356
148
-60
-268
-476
-684
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓

Рисунок 4.24.

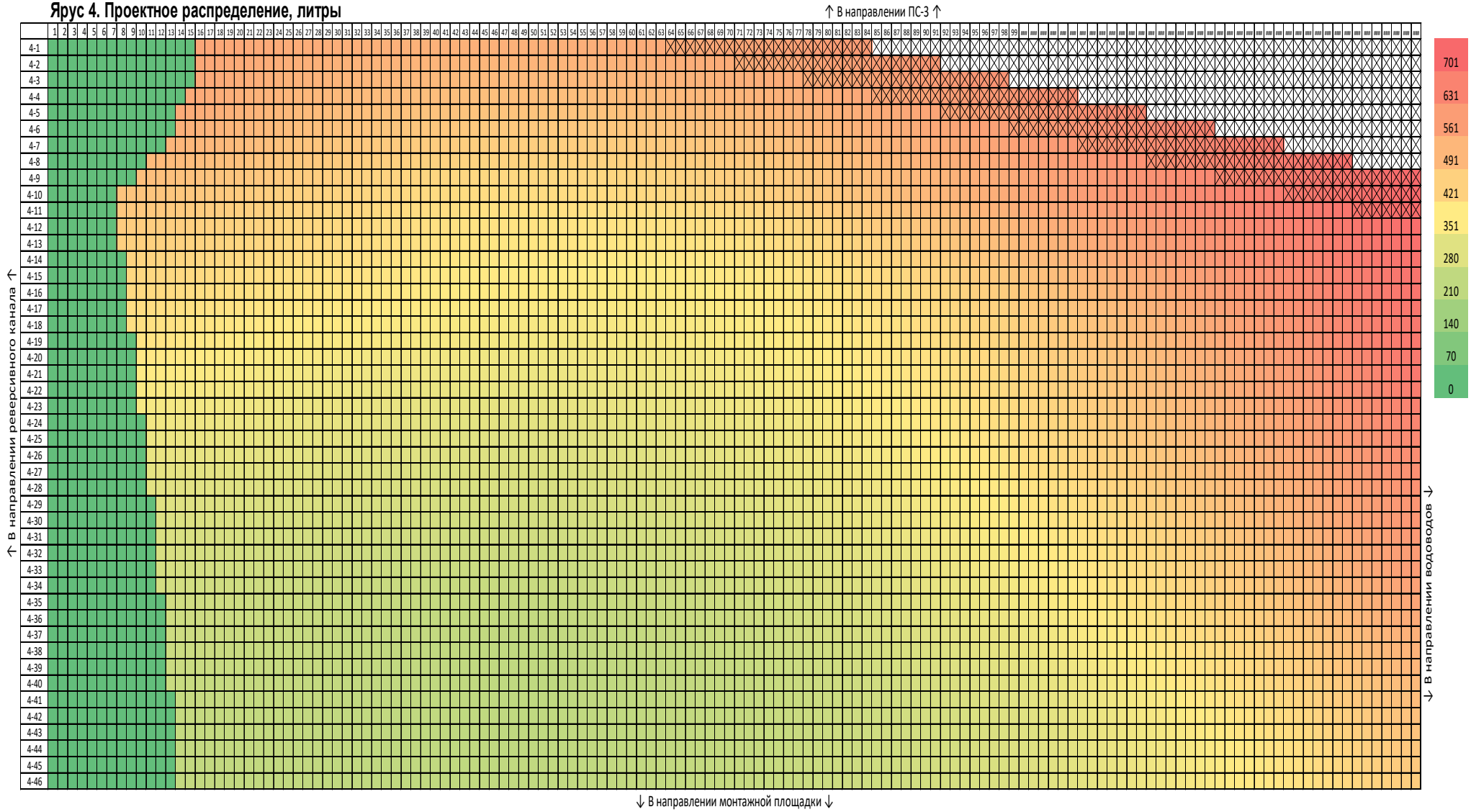

Ярус 4. Проектное распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
701
631
561
491
421
351
280
210
140
70
0

Рисунок 4.25.

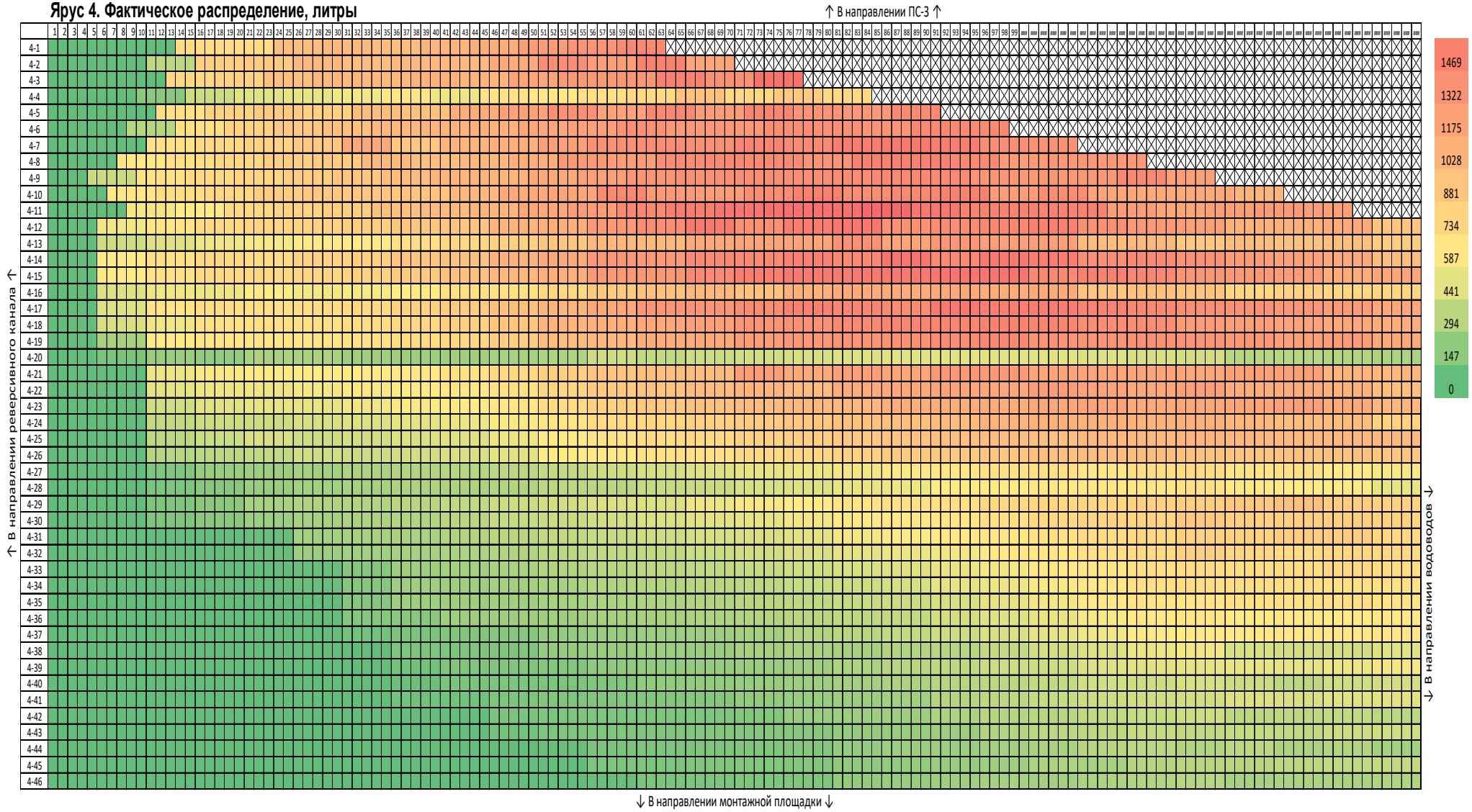

Ярус 4. Фактическое распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
1469
1322
1175
1028
881
734
587
441
294
147
0

Рисунок 4.26.

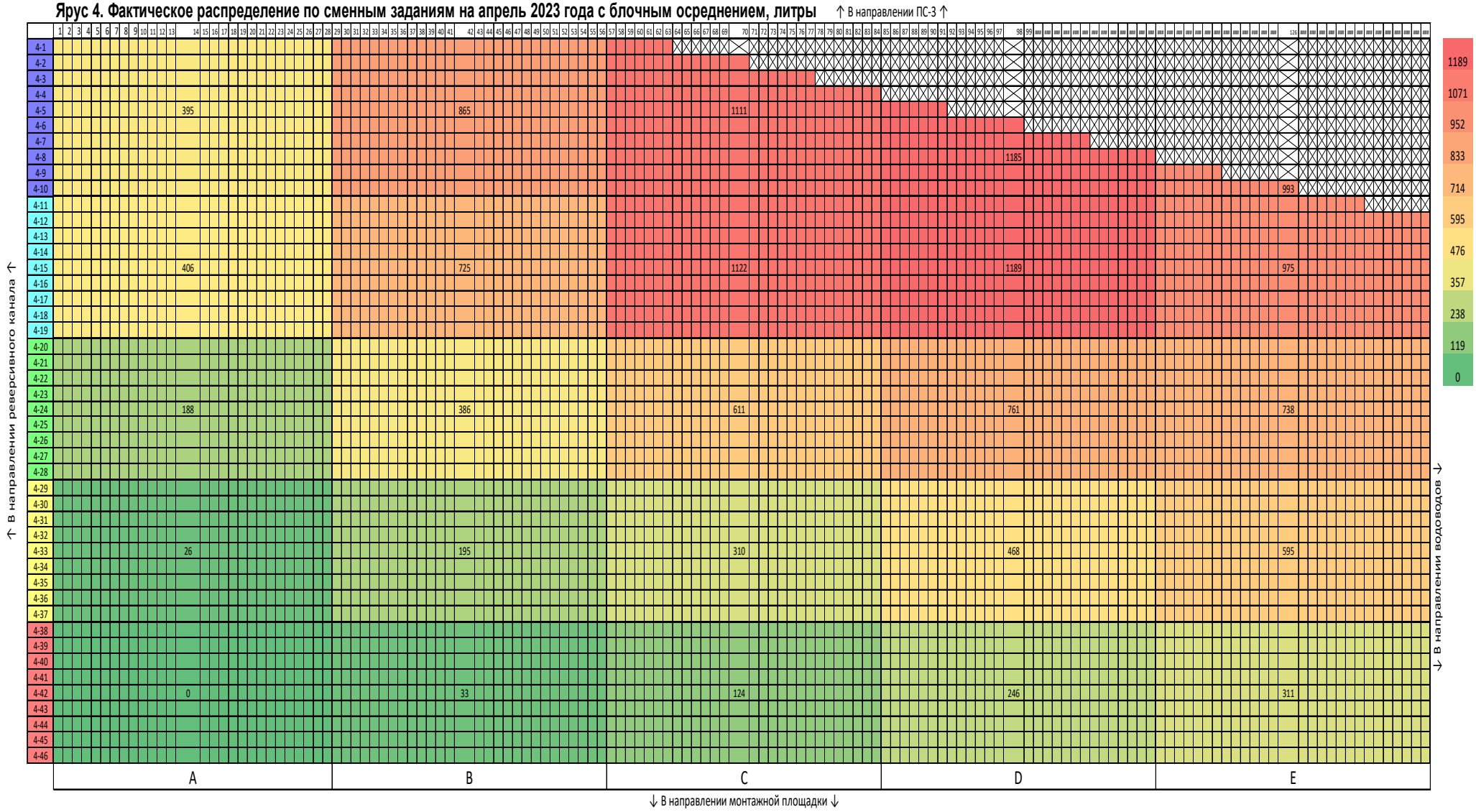

Ярус 4. Фактическое распределение по сменным заданиям на апрель 2023 года с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
1189
1071
952
833
714
595
476
357
238
119
0
395
865
1111
1185
993
406
725
1122
1189
975
188
386
611
761
738
26
195
310
468
595
0
33
124
246
311

Рисунок 4.27.

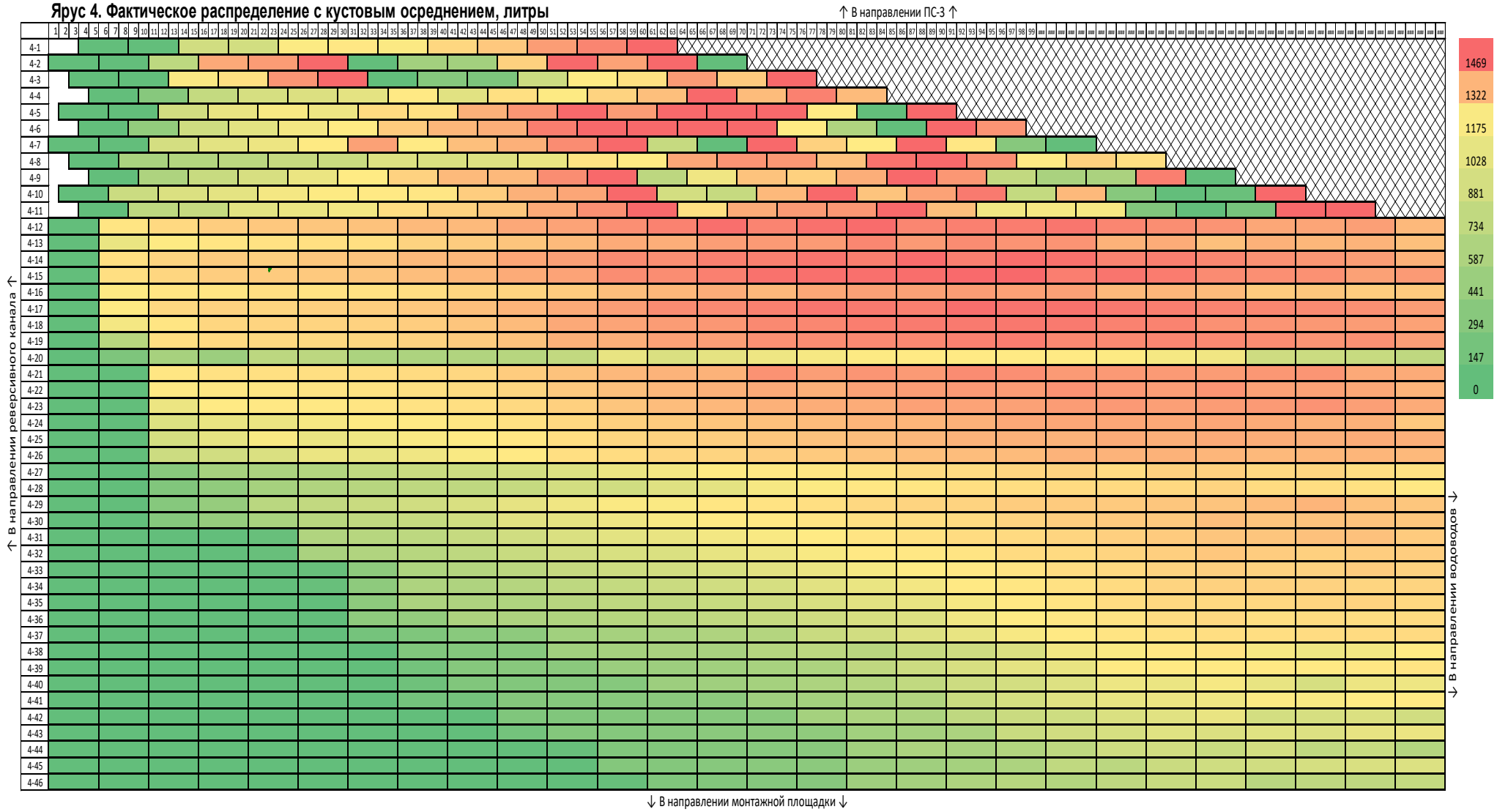

Ярус 4. Фактическое распределение с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99
4-1 4-2 4-3 4-4 4-5 4-6 4-7 4-8 4-9 4-10 4-11 4-12 4-13 4-14 4-15 4-16 4-17 4-18 4-19 4-20 4-21 4-22 4-23 4-24 4-25 4-26 4-27 4-28 4-29 4-30 4-31 4-32 4-33 4-34 4-35 4-36 4-37 4-38 4-39 4-40 4-41 4-42 4-43 4-44 4-45 4-46
1469
1322
1175
1028
881
734
587
441
294
147
0
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓

Рисунок 4.28.

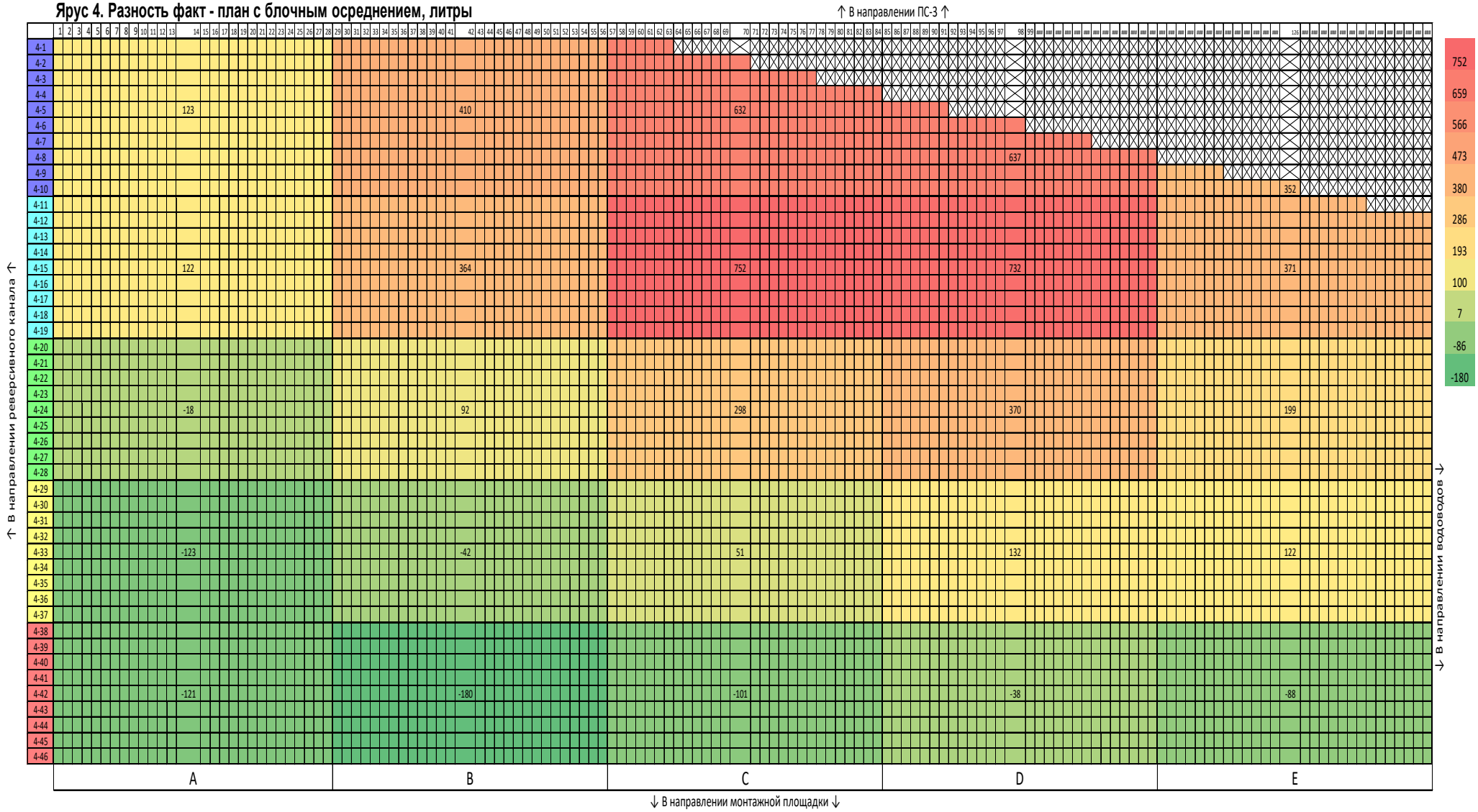

Ярус 4. Разность факт - план с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
123
410
632
637
352
122
364
752
732
371
-18
92
298
370
199
-123
-42
51
132
122
-121
-180
-101
-38
-88
752
659
566
473
380
286
193
100
7
-86
-180

Рисунок 4.29.

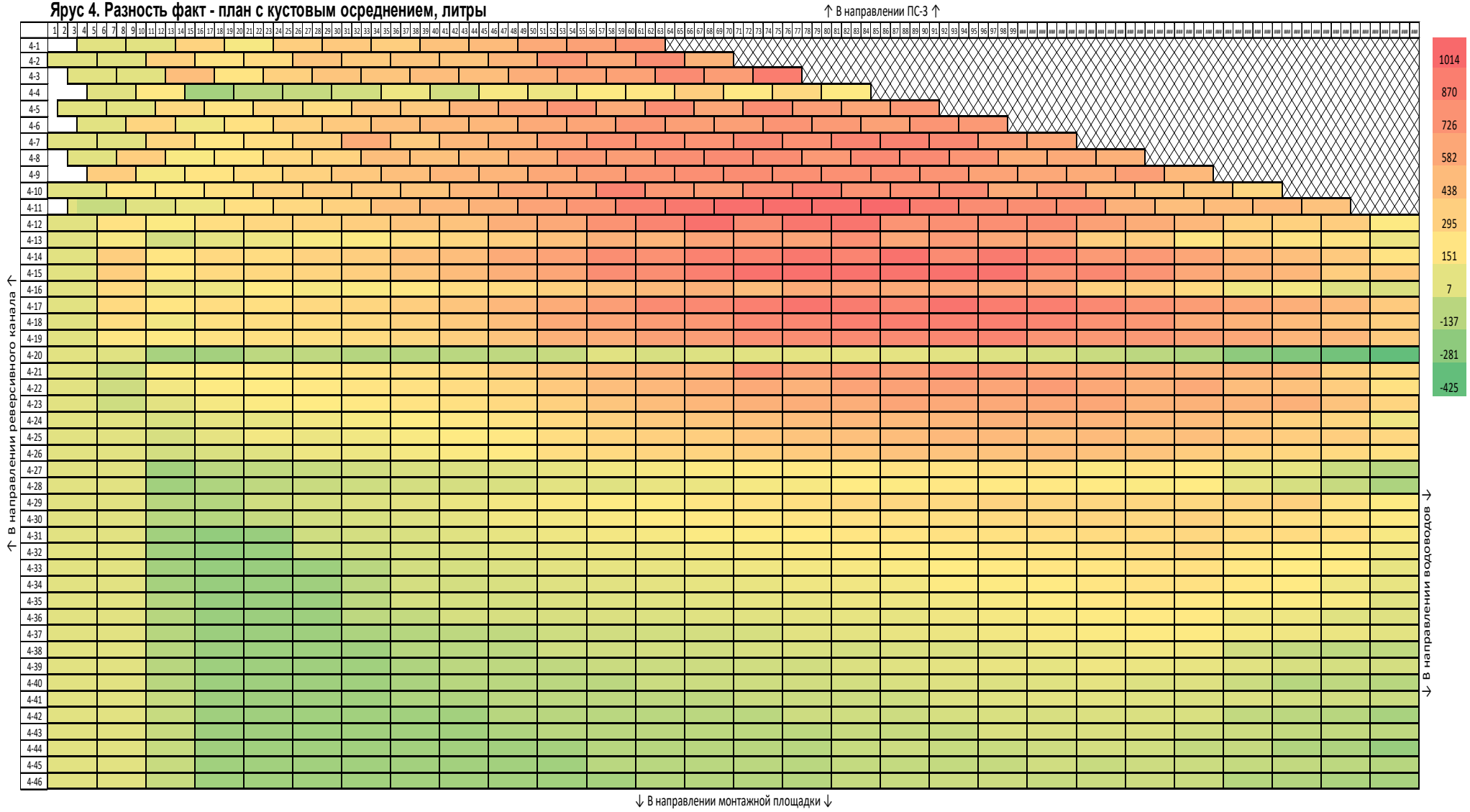

Ярус 4. Разность факт - план с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
← В направлении реверсивного канала ←
→ В направлении водоводов →
↓ В направлении монтажной площадки ↓
1014
870
726
582
438
295
151
7
-137
-281
-425

Рисунок 4.30.

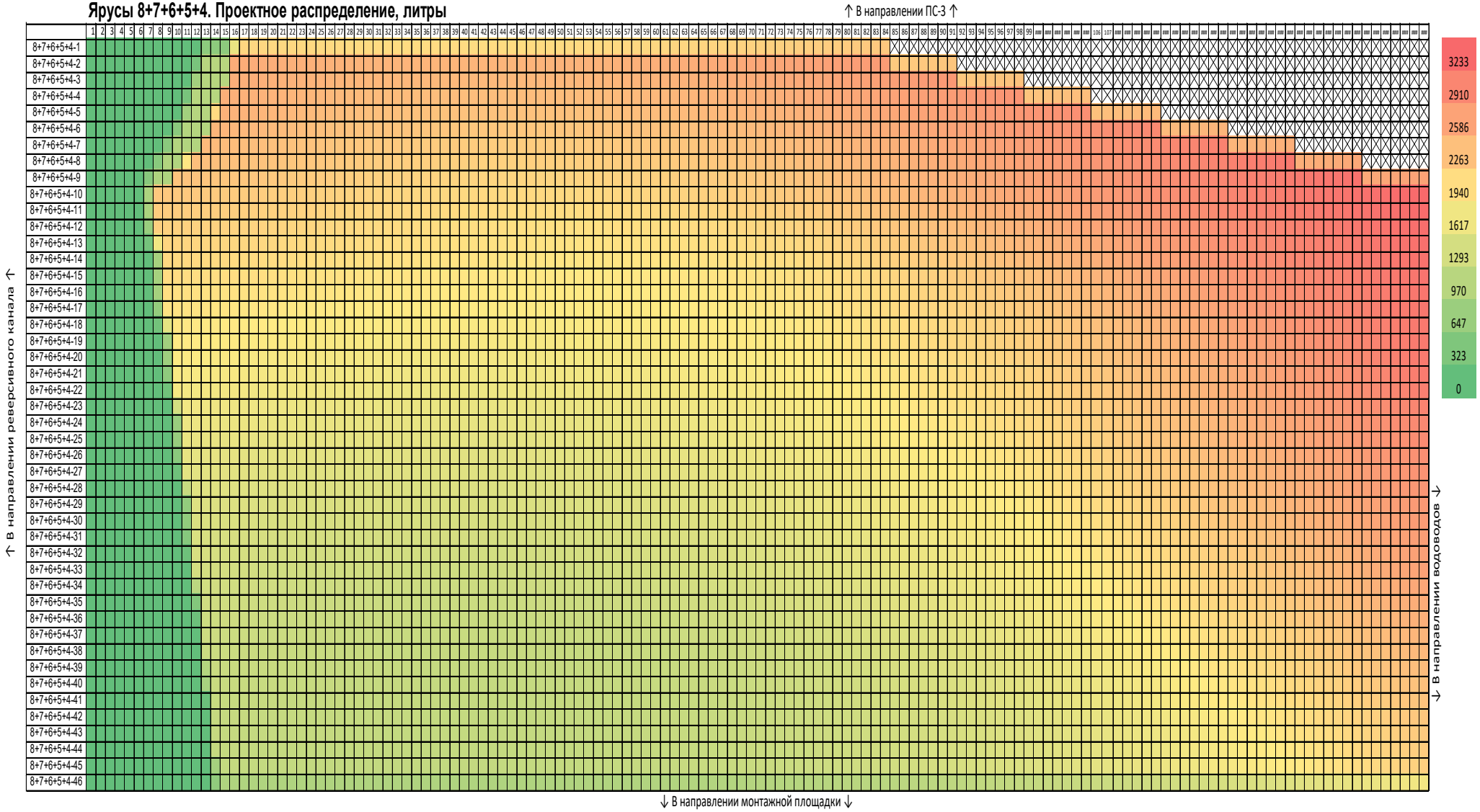

Ярусы 8+7+6+5+4. Проектное распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓
3233
2910
2586
2263
1940
1617
1293
970
647
323
0

Рисунок 4.31.

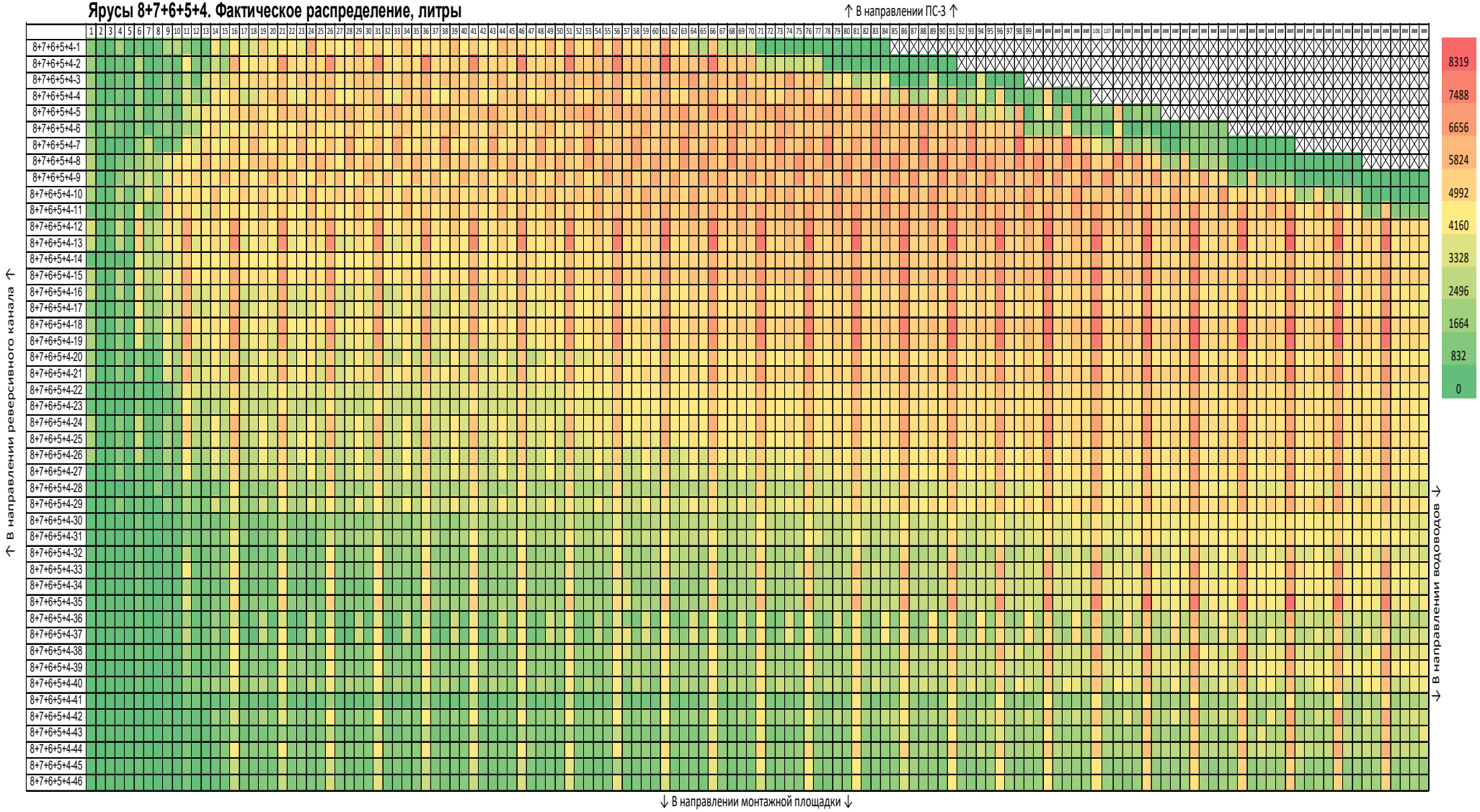

Ярусы 8+7+6+5+4. Фактическое распределение, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓
8319
7488
6656
5824
4992
4160
3328
2496
1664
832
0

Рисунок 4.32.

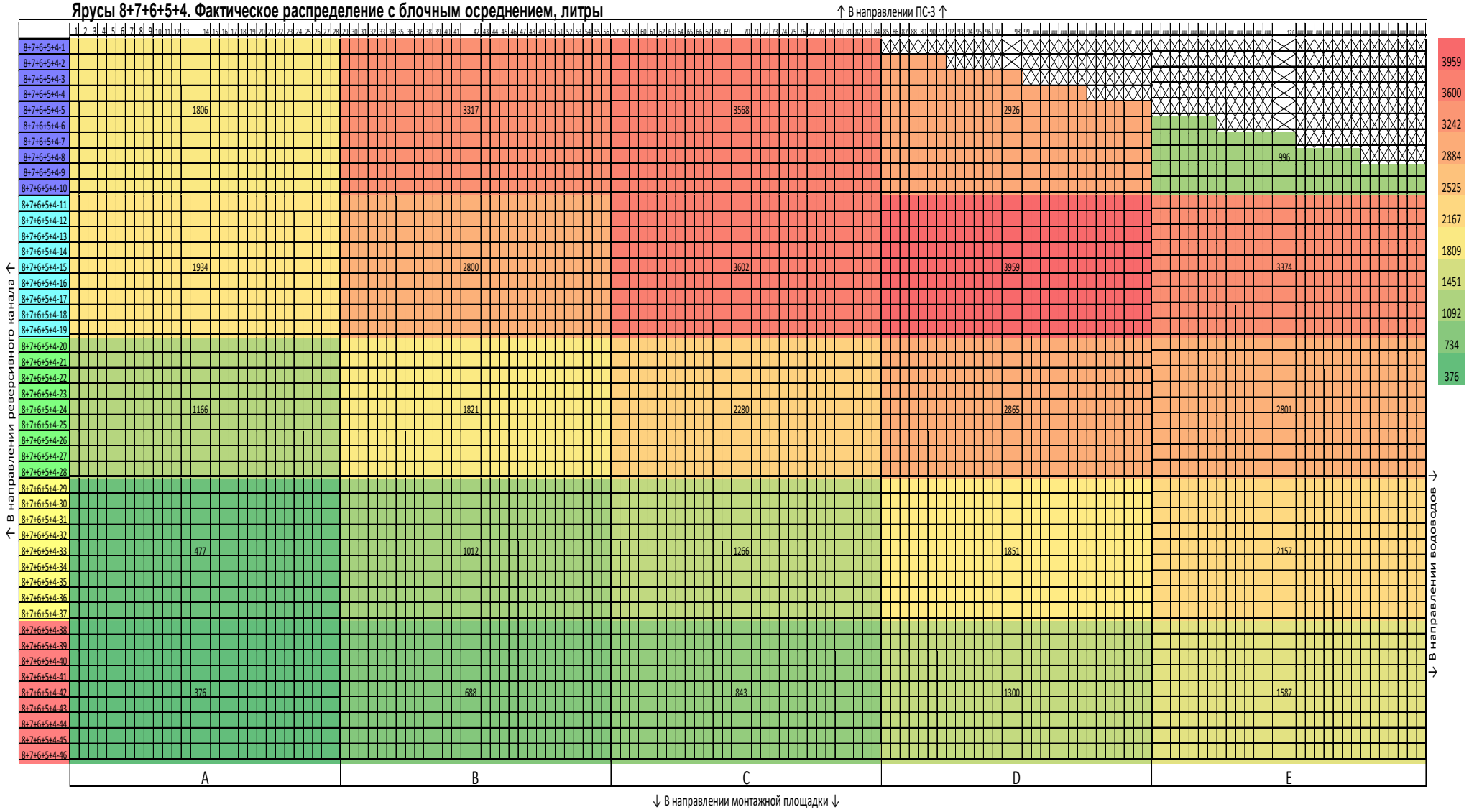

Ярусы 8+7+6+5+4. Фактическое распределение с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
1806
3317
3568
2926
996
1934
2800
3602
3959
3374
1166
1821
2280
2865
2801
477
1012
1266
1851
2157
376
688
843
1300
1587
3959
3600
3242
2884
2525
2167
1809
1451
1092
734
376

Рисунок 4.33.

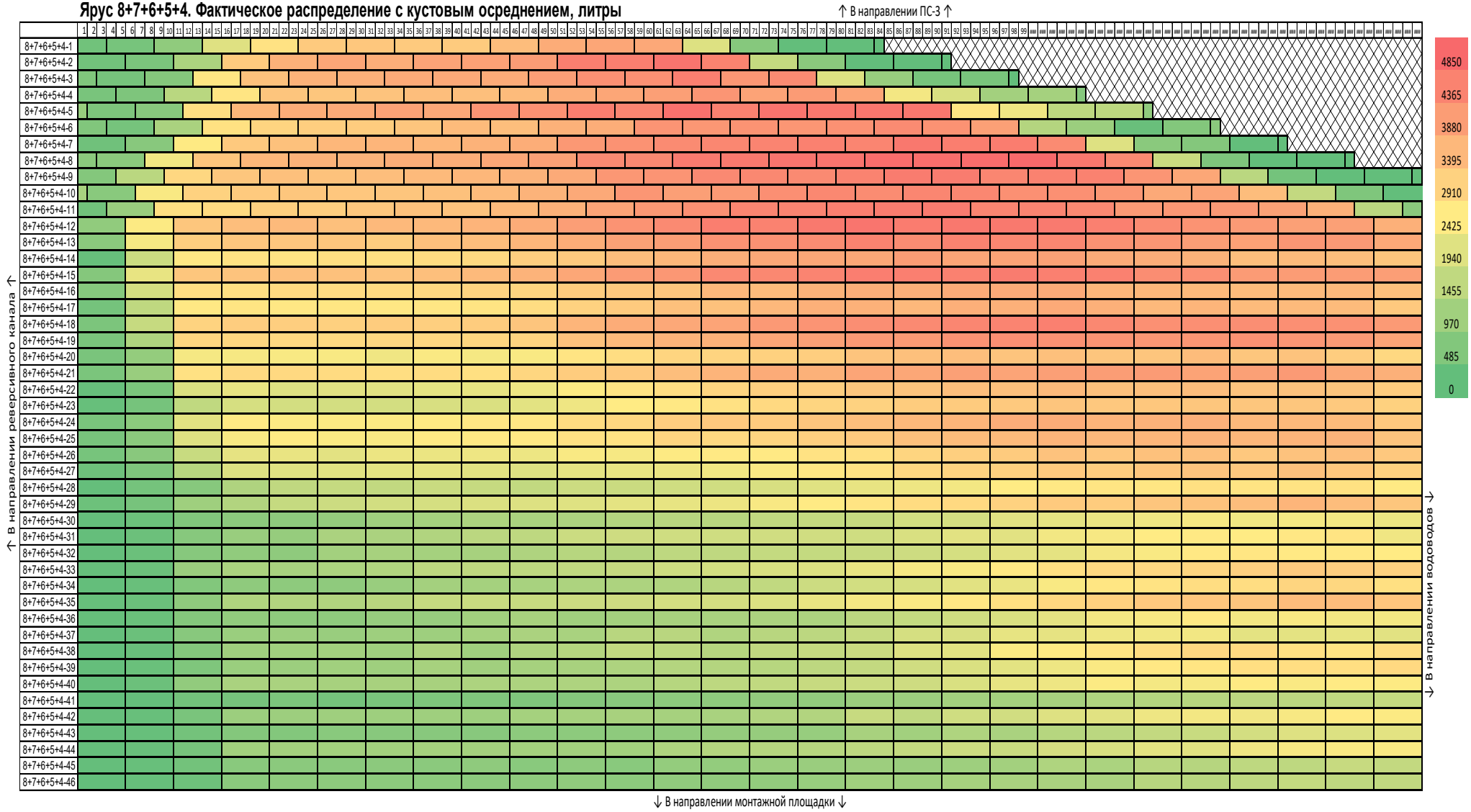

Ярус 8+7+6+5+4. Фактическое распределение с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
8+7+6+5+4-1
8+7+6+5+4-2
8+7+6+5+4-3
8+7+6+5+4-4
8+7+6+5+4-5
8+7+6+5+4-6
8+7+6+5+4-7
8+7+6+5+4-8
8+7+6+5+4-9
8+7+6+5+4-10
8+7+6+5+4-11
8+7+6+5+4-12
8+7+6+5+4-13
8+7+6+5+4-14
8+7+6+5+4-15
8+7+6+5+4-16
8+7+6+5+4-17
8+7+6+5+4-18
8+7+6+5+4-19
8+7+6+5+4-20
8+7+6+5+4-21
8+7+6+5+4-22
8+7+6+5+4-23
8+7+6+5+4-24
8+7+6+5+4-25
8+7+6+5+4-26
8+7+6+5+4-27
8+7+6+5+4-28
8+7+6+5+4-29
8+7+6+5+4-30
8+7+6+5+4-31
8+7+6+5+4-32
8+7+6+5+4-33
8+7+6+5+4-34
8+7+6+5+4-35
8+7+6+5+4-36
8+7+6+5+4-37
8+7+6+5+4-38
8+7+6+5+4-39
8+7+6+5+4-40
8+7+6+5+4-41
8+7+6+5+4-42
8+7+6+5+4-43
8+7+6+5+4-44
8+7+6+5+4-45
8+7+6+5+4-46
4850
4365
3880
3395
2910
2425
1940
1455
970
485
0
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓

Рисунок 4.34.


Ярусы 8+7+6+5+4. Разность факт - план с блочным осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓
A
B
C
D
E
1692
1339
985
632
279
-75
-428
-781
-1134
-1488
-1841
453
1141
1257
350
-1841
529
965
1692
1682
525
125
291
637
887
239
-292
-245
-111
145
-100
-278
-410
-330
-123
-295

Рисунок 4.35.

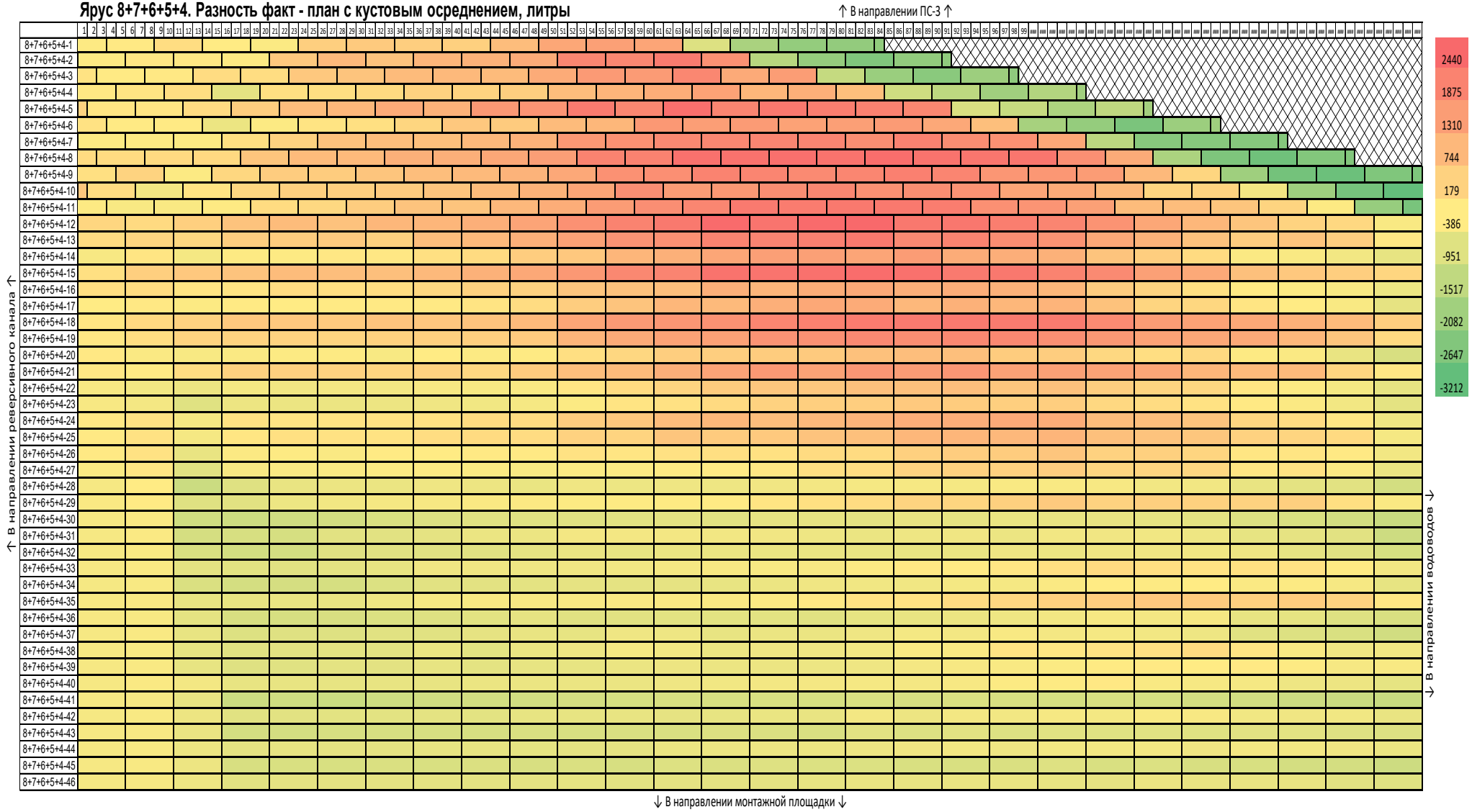

Ярус 8+7+6+5+4. Разность факт - план с кустовым осреднением, литры
↑ В направлении ПС-3 ↑
8+7+6+5+4-1
8+7+6+5+4-2
8+7+6+5+4-3
8+7+6+5+4-4
8+7+6+5+4-5
8+7+6+5+4-6
8+7+6+5+4-7
8+7+6+5+4-8
8+7+6+5+4-9
8+7+6+5+4-10
8+7+6+5+4-11
8+7+6+5+4-12
8+7+6+5+4-13
8+7+6+5+4-14
8+7+6+5+4-15
8+7+6+5+4-16
8+7+6+5+4-17
8+7+6+5+4-18
8+7+6+5+4-19
8+7+6+5+4-20
8+7+6+5+4-21
8+7+6+5+4-22
8+7+6+5+4-23
8+7+6+5+4-24
8+7+6+5+4-25
8+7+6+5+4-26
8+7+6+5+4-27
8+7+6+5+4-28
8+7+6+5+4-29
8+7+6+5+4-30
8+7+6+5+4-31
8+7+6+5+4-32
8+7+6+5+4-33
8+7+6+5+4-34
8+7+6+5+4-35
8+7+6+5+4-36
8+7+6+5+4-37
8+7+6+5+4-38
8+7+6+5+4-39
8+7+6+5+4-40
8+7+6+5+4-41
8+7+6+5+4-42
8+7+6+5+4-43
8+7+6+5+4-44
8+7+6+5+4-45
8+7+6+5+4-46
2440
1875
1310
744
179
-386
-951
-1517
-2082
-2647
-3212
↑ В направлении реверсивного канала ↑
↓ В направлении водоводов ↓
↓ В направлении монтажной площадки ↓

Рисунок 4.36.

Таблица 4.1.

Сводные результаты инъектирования по манжетным колоннам

МК	Ярус 8	Ярус 7	Ярус 6	Ярус 5	Ярус 4
1	26 265	27 764	37 606	61 464	44 674
2	26 859	24 096	48 806	72 762	53 072
3	24 615	38 917	49 887	80 176	63 259
4	40 966	40 263	51 323	92 420	37 790
5	55 969	59 764	64 668	111 900	77 120
6	0	13 966	67 467	109 687	85 068
7	40 569	76 145	63 398	125 211	97 472
8	44 944	58 042	78 593	132 817	102 611
9	72 357	0	66 194	138 747	110 765
10	51 662	71 731	74 528	142 931	115 657
11	50 341	58 955	61 122	146 736	130 368
12	52 817	53 033	111 757	159 702	130 945
13	51 612	60 615	103 590	154 582	103 697
14	69 389	0	0	155 702	134 452
15	90 401	0	110 191	151 001	137 178
16	84 471	20 892	109 394	16 558	92 581
17	32 014	46 987	93 072	130 688	132 029
18	46 355	73 094	100 044	131 804	124 617
19	60 380	6 978	83 513	121 836	120 281
20	30 638	62 110	94 045	122 243	36 674
21	40 135	45 936	82 175	115 103	106 161
22	44 783	44 806	4 445	111 209	100 125
23	44 262	32 018	0	94 793	97 284
24	43 058	54 783	80 572	92 488	84 568
25	49 254	24 795	81 052	68 816	81 520
26	37 816	49 640	69 882	70 462	75 388
27	40 957	40 311	66 919	70 070	49 754
28	65 507	13 207	0	65 983	44 877
29	50 111	21 499	70 348	67 553	59 773
30	7 209	11 316	17 516	54 401	56 129
31	35 602	11 162	28 231	56 314	51 046
32	0	63 810	51 777	7 404	46 888
33	45 256	44 591	44 243	52 223	42 364
34	0	43 776	41 507	49 054	40 313
35	58 142	53 755	42 093	45 696	37 973
36	0	43 987	25 242	35 896	34 978
37	10 119	45 375	32 342	37 060	31 981
38	44 349	33 312	38 304	34 103	26 262
39	32 457	46 511	37 982	34 062	26 363
40	34 974	21 339	46 242	31 320	22 448
41	8 721	35 134	0	19 890	22 583
42	49 005	10 911	41 373	18 046	18 725
43	7 231	37 987	37 597	17 911	18 561
44	48 353	30 057	35 002	16 136	15 229
45	6 207	31 277	34 564	0	15 618
46	33 213	-	33 208	-	14 150
Всего	1 789 346	1 684 649	2 511 814	3 624 963	3 151 369
Поправочный коэффициент на погрешность расходомеров	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88

Таблица 4.2.

Сводные результаты инъектирования по ярусам

Ярус	Проект	Факт	Факт/проект, %
8	2 160 989	1 789 346	83%
7	2 114 011	1 684 649	80%
6	2 139 277	2 511 814	117%
5	2 092 771	3 624 963	173%
4	2 156 788	3 151 369	146%
3	2 109 901	-	-
2	2 186 902	-	-
1	2 139 361	-	-
Суммарно по ярусам 8, 7, 6, 5, 4	10 663 836	12 762 141	120%
Всего	17 100 000	12 762 141	75%

5. Анализ данных мониторинга высотного положения бетонных сооружений

Проектное распределение вертикальных перемещений здания ГАЭС в ходе выравнивания в зависимости от инъектированного объема медленнотвердеющего компенсационного раствора принято по данным [2.18]. Проектные данные представлены в таблице 5.1.

Геодезическая съемка подъёма здания ГАЭС начата 04.07.2021 (снято нулевое показание). В дальнейшем наблюдения за подъемом усилены с помощью системы гидростатического нивелирования отечественного производства, развертывание которой начато с 2023 года.

Следует обратить внимание, что на момент нулевого отсчета было инъектировано порядка 9% компенсационного раствора от проектного объема, т.е. порядка 1500 м^3. Регулярные тахеометрические наблюдения начались в сентябре-октябре 2021 года. Наибольший подъем фиксировался по марке МТ-62 в угловой части здания со стороны водоводов и ППТУ-4 (с правого берега по направлению потока в турбинном режиме), а также по марке МТ-3 в угловой части здания со стороны ПС-3 (также с правого берега).

Фактические данные по инъектированным объемам представлены выше в разделе 4.

Сопоставление проектных и фактических данных представлено на рисунках 5.1–5.3, на котором построен график подъема в зависимости от инъектированого объема, что характеризует эффективность компенсационного нагнетания. Также выполнена прогнозная экстраполяция динамики подъема.

Видно, что коридор прогнозной экстраполяции имеет тенденцию к сужению по ходу подъема, а характер прогнозной экстраполяции сохраняется. Это является косвенным свидетельством положительного хода реализации уникального проекта компенсационного нагнетания.

Динамика эффективности компенсационного нагнетания, т.е. отношение величины подъема к объему инъектированного компенсационного раствора, представлена на рисунке 5.4. Видно, что эффективность компенсационного нагнетания по ходу подъема возрастает.

Приведенные данные зависимости подъема здания ГАЭС от объема инъектированного компенсационного раствора и его распределения по манжетам (см. выше раздел 4) используются для калибровки математической модели выравнивания здания ГАЭС (см. ниже раздел 6).

На основе данных рисунков 5.1–5.4 по итогам компенсационного нагнетания на ярусах 8, 7, 6, 5, 4 можно сделать предварительный вывод, что подъем на проектную высоту может потребовать увеличения объема компенсационного раствора, по сравнению с проектным. При этом следует обратить внимание на повышение эффективности компенсационного нагнетания, достигнутое, в том числе, благодаря внедрению практики оптимизации сменных зданий на основе математического моделирования методом конечных элементов с учетом результатов текущего мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов на предыдущих ярусах манжетных колонн. Этот результат позволяет прогнозировать дальнейшее возрастание эффективности компенсационного нагнетания.

Таблица 5.1

Проектная динамика подъема в точке наблюдения с наибольшим подъемом

Ярусы манжетного поля	Накопленный объем, м^3	Относительный накопленный объем, %	Расчетное вертикальное перемещение, мм
1	*2*	*3*	*4*
8-й ярус	0	0%	-1.4
	171	1%	-1.2
	342	2%	-0.6
	513	3%	0.3
	684	4%	1.5
	855	5%	3.1
	1026	6%	5.0
	1197	7%	7.3
	1368	8%	9.9
	1539	9%	12.9
	1710	10%	16.1
	1881	11%	19.8
	2052	12%	23.7
	2223	13%	28.0
7-й ярус	2394	14%	32.7
	2565	15%	37.6
	2736	16%	42.9
	2907	17%	48.6
	3078	18%	54.5
	3249	19%	60.8
	3420	20%	67.5
	3591	21%	74.4
	3762	22%	81.7
	3933	23%	89.4
	4104	24%	97.3
	4275	25%	105.6
6-й ярус	4446	26%	114.2
	4617	27%	123.1
	4788	28%	132.4

Ярусы манжетного поля	Накопленный объем, м^3	Относительный накопленный объем, %	Расчетное вертикальное перемещение, мм
1	*2*	*3*	*4*
	4959	29%	141.9
	5130	30%	151.8
	5301	31%	158.7
	5472	32%	168.1
	5643	33%	177.8
	5814	34%	187.7
	5985	35%	197.9
	6156	36%	208.4
	6327	37%	219.0
	6498	38%	230.0
5-й ярус	6669	39%	241.2
	6840	40%	252.7
	7011	41%	264.4
	7182	42%	276.3
	7353	43%	288.6
	7524	44%	301.1
	7695	45%	313.8
	7866	46%	326.8
	8037	47%	340.1
	8208	48%	353.6
	8379	49%	367.4
	8550	50%	381.4
4-й ярус	8721	51%	395.7
	8892	52%	410.3
	9063	53%	425.1
	9234	54%	440.2
	9405	55%	455.6
	9576	56%	471.2
	9747	57%	487.0
	9918	58%	503.1
	10089	59%	519.5
	10260	60%	536.2
	10431	61%	553.1
	10602	62%	570.2
	10773	63%	587.7
3-й яру	10944	64%	605.4
	11115	65%	623.3
	11286	66%	641.5
	11457	67%	660.0
	11628	68%	678.8
	11799	69%	697.8
	11970	70%	717.0
	12141	71%	736.6
	12312	72%	756.4

Ярусы манжетного поля	Накопленный объем, м^3	Относительный накопленный объем, %	Расчетное вертикальное перемещение, мм
1	*2*	*3*	*4*
	12483	73%	776.4
	12654	74%	796.8
	12825	75%	817.4
2-й ярус	12996	76%	838.2
	13167	77%	859.3
	13338	78%	880.7
	13509	79%	902.4
	13680	80%	924.3
	13851	81%	946.5
	14022	82%	968.9
	14193	83%	991.6
	14364	84%	1014.6
	14535	85%	1037.9
	14706	86%	1061.4
	14877	87%	1085.2
	15048	88%	1109.2
1-й ярус	15219	89%	1133.5
	15390	90%	1158.1
	15561	91%	1183.0
	15732	92%	1208.1
	15903	93%	1233.5
	16074	94%	1259.2
	16245	95%	1285.1
	16416	96%	1311.3
	16587	97%	1337.8
	16758	98%	1364.5
	16929	99%	1391.5
	17100	100%	1418.8

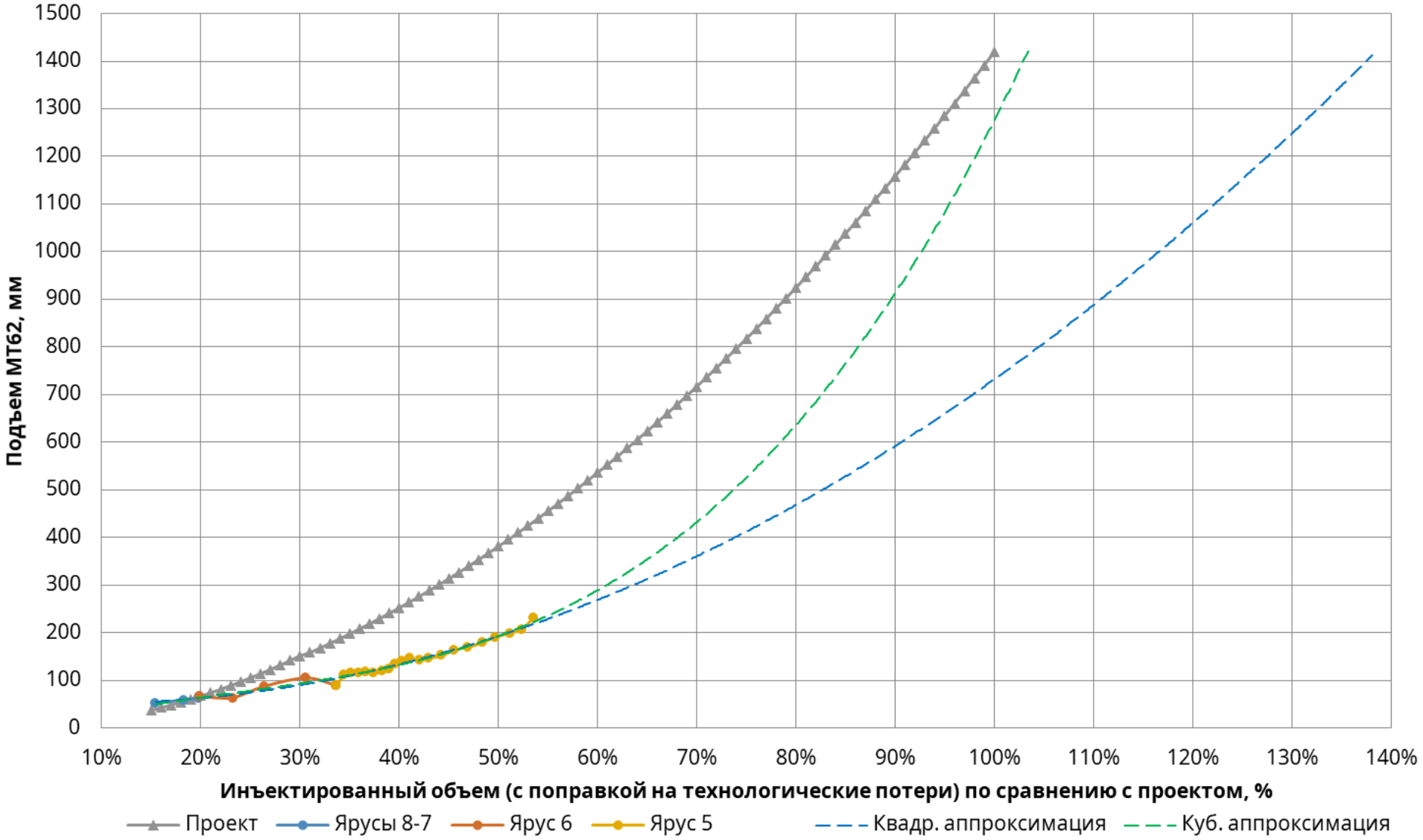


Рисунок 5.1. Сопоставление расчетной и фактической динамики подъема по итогам нагнетания на ярусах 8, 7, 6, 5 с прогнозной экстраполяцией (по данным на апрель 2023 года)

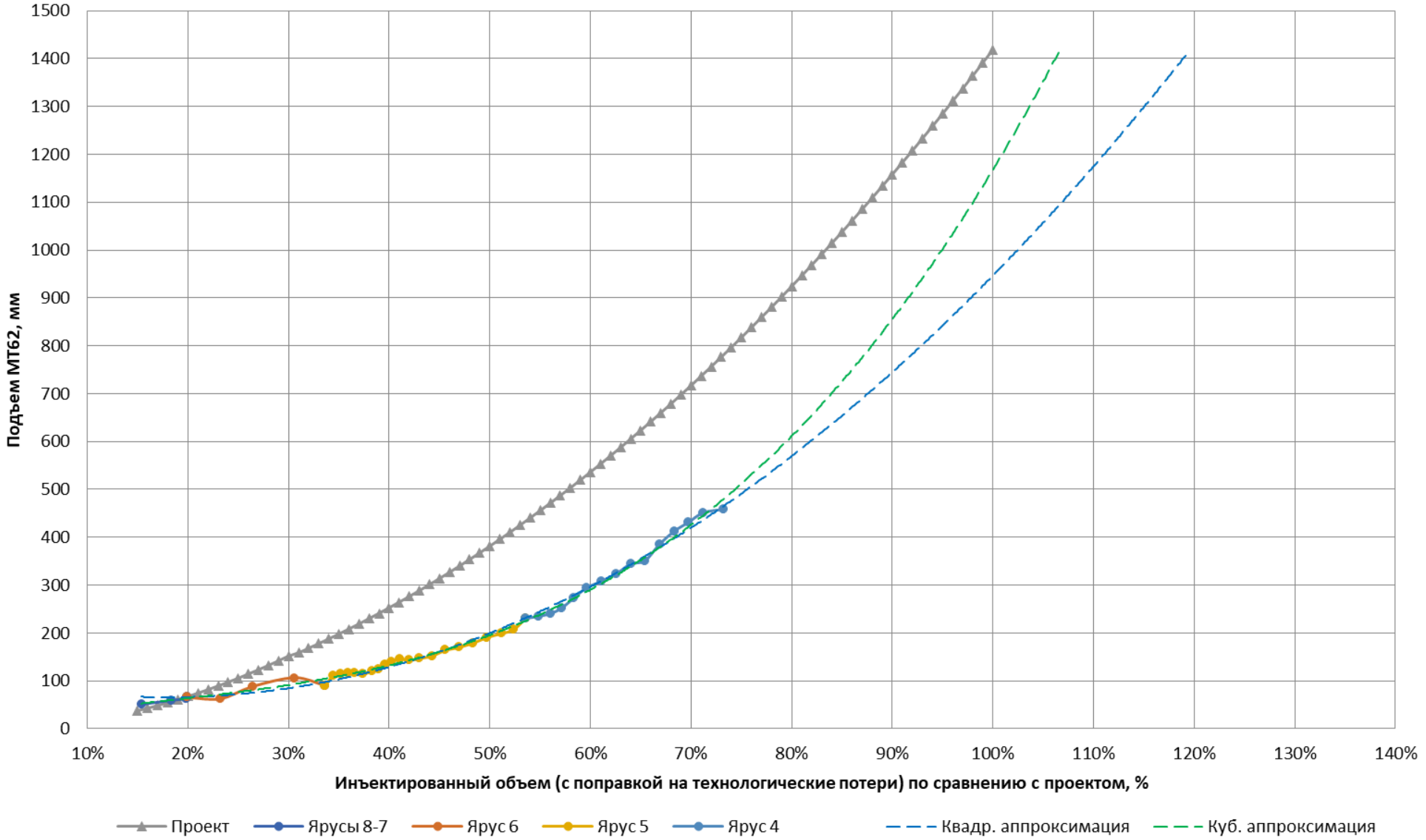


Рисунок 5.2. Сопоставление расчетной и фактической динамики подъема по итогам нагнетания на ярусах 8, 7, 6, 5, 4 с прогнозной экстраполяцией (по данным на март 2024 года)

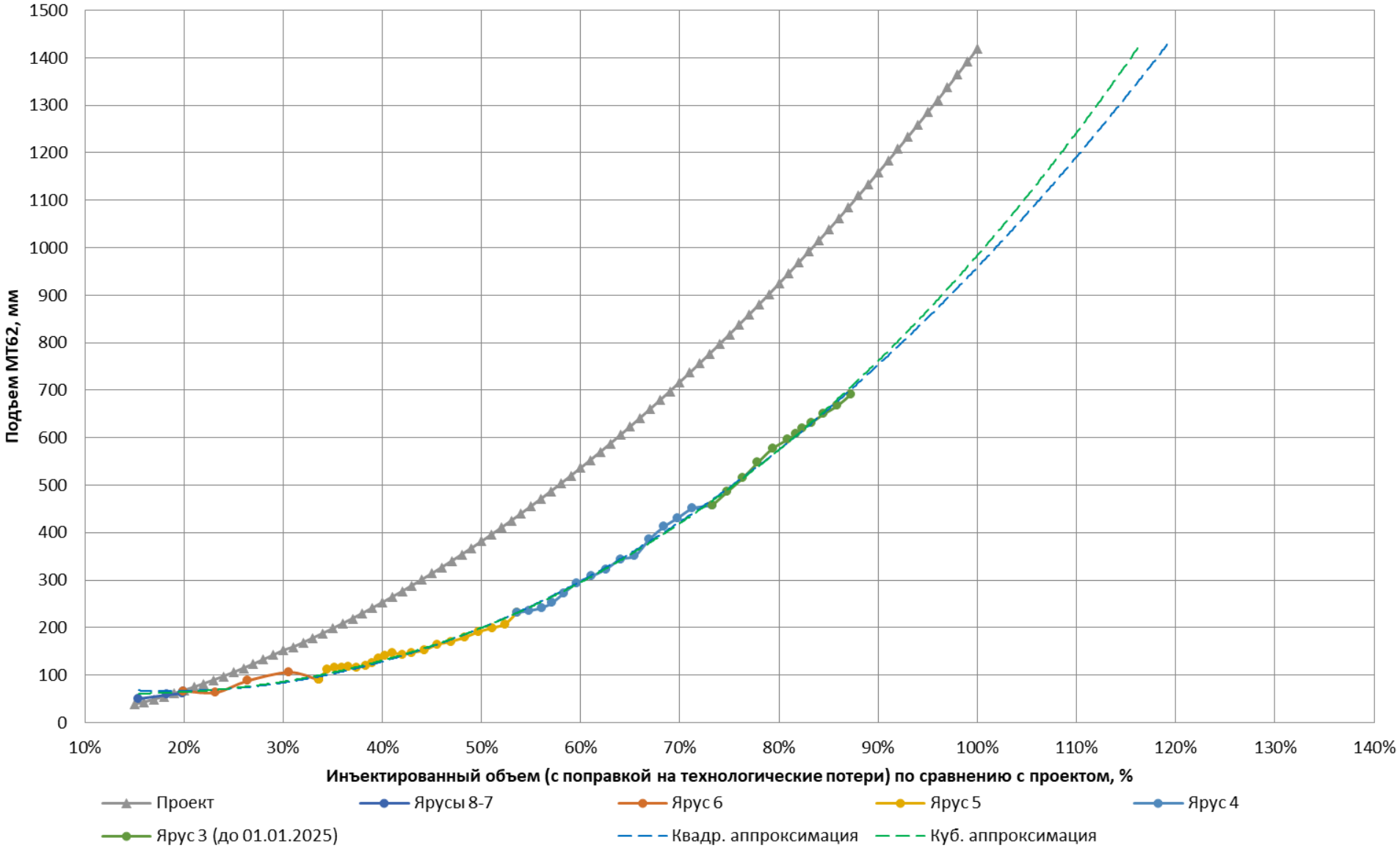


Рисунок 5.3. Сопоставление расчетной и фактической динамики подъема по итогам нагнетания на ярусах 8, 7, 6, 5, 4 и начавшегося яруса 3 с прогнозной экстраполяцией (по данным на январь 2025 года)

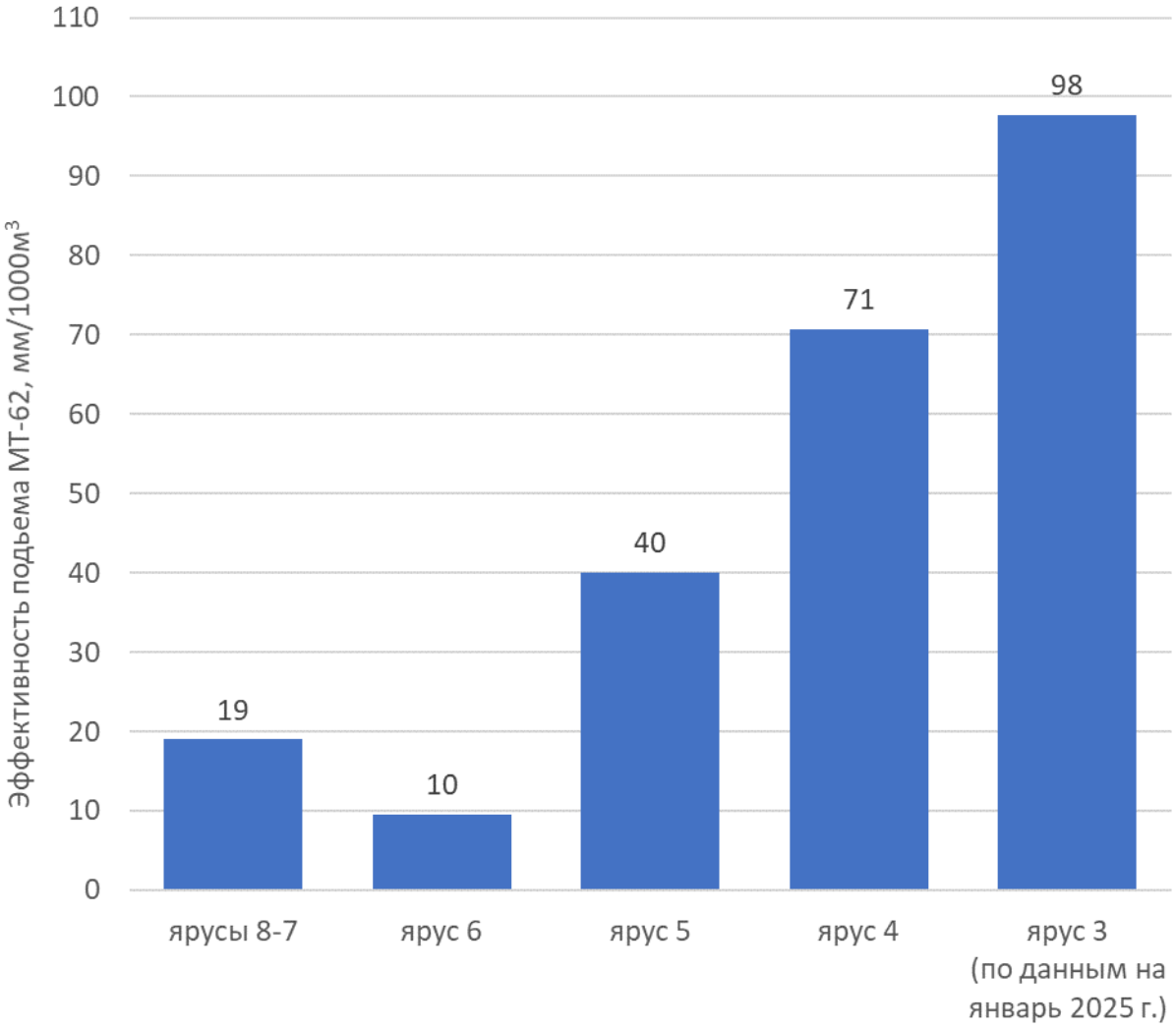


Рисунок 5.4. Эффективность компенсационного нагнетания по итогам нагнетания на ярусах 8, 7, 6, 5, 4 и начавшегося яруса 3 (по данным на январь 2025 года)

6. Оптимизации сменных зданий на основе математического моделирования методом конечных элементов с учетом результатов мониторинга и накопленных инъекционных объемов

6.1. Методика оптимизации распределения объемов компенсационного раствора на основе математического моделирования методом конечных элементов с использованием теории планирования эксперимента

Оптимизация распределения объемов компенсационного раствора выполняется на основе сопоставительного исследования множества сценарных вариантов распределения компенсационного раствора методом активного вычислительного эксперимента по теории планирования эксперимента. Расчеты выполняются методом конечных элементов на трехмерной модели компенсационного нагнетания в ПВК ZSoil, которая откалибрована по результатам мониторинга и учитывает накопленные инъекционные объемы на всех ярусах манжетных колонн за период с начала компенсационного нагнетания (рисунок 6.1).

В качестве отклика по теории планирования эксперимента принята величина подъема угловой части здания ГАЭС со стороны водоводов и ППТУ-4 по марке МТ-62. В качестве варьируемых факторов – расходы инъекционного раствора в характерных точках манжетного поля. В качестве плана эксперимента принят план второго порядка Бокса-Бенкена в связи с тем, что зависимость вертикальных перемещений от параметров компенсационного нагнетания поддается описанию полиномом второго порядка.

$$\varphi(\overline{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \beta_{ij} x_i x_j \ ,$$

где x – варьируемые факторы, β_0, β_i, β_{ii} и β_{ij} – неизвестные коэффициенты регрессии,

В рамках плана второго порядка каждый фактор варьируется на трех уровнях.

Суть применения теории планирования эксперимента заключается в следующем:

- вместо перебора возможных сочетаний варьируемых факторов (например, при трех уровнях варьирования девяти факторов имеем 3^9 = 19683 сочетания, уже при 19 факторах имеем свыше миллиарда сочетаний) используется специальный план эксперимента, который позволяет путём обобщения относительно небольшого числа опытов получить функцию отклика для прогнозирования подъема здания ГАЭС при произвольном сочетании варьируемых факторов;

- далее путем математического анализа функции отклика методом градиентного спуска прогнозируется ранее неизвестное сочетание промежуточных уровней варьирования факторов, при котором подъем здания ГАЭС максимален.

  Для расчетов факторы кодируются по формуле:

$$x_к = \frac{x_н - x_0}{I}$$

  где $x_к$ – кодированное значение фактора,

  $x_н$ – натуральное значение фактора

  $x_0 = (x_{max} + x_{min}) / 2$ – средний уровень фактора,

  $I = (x_{max} – x_{min}) / 2$ – интервал варьирования,

  x_{max} и x_{min} – максимум и минимум натуральных значений фактора.

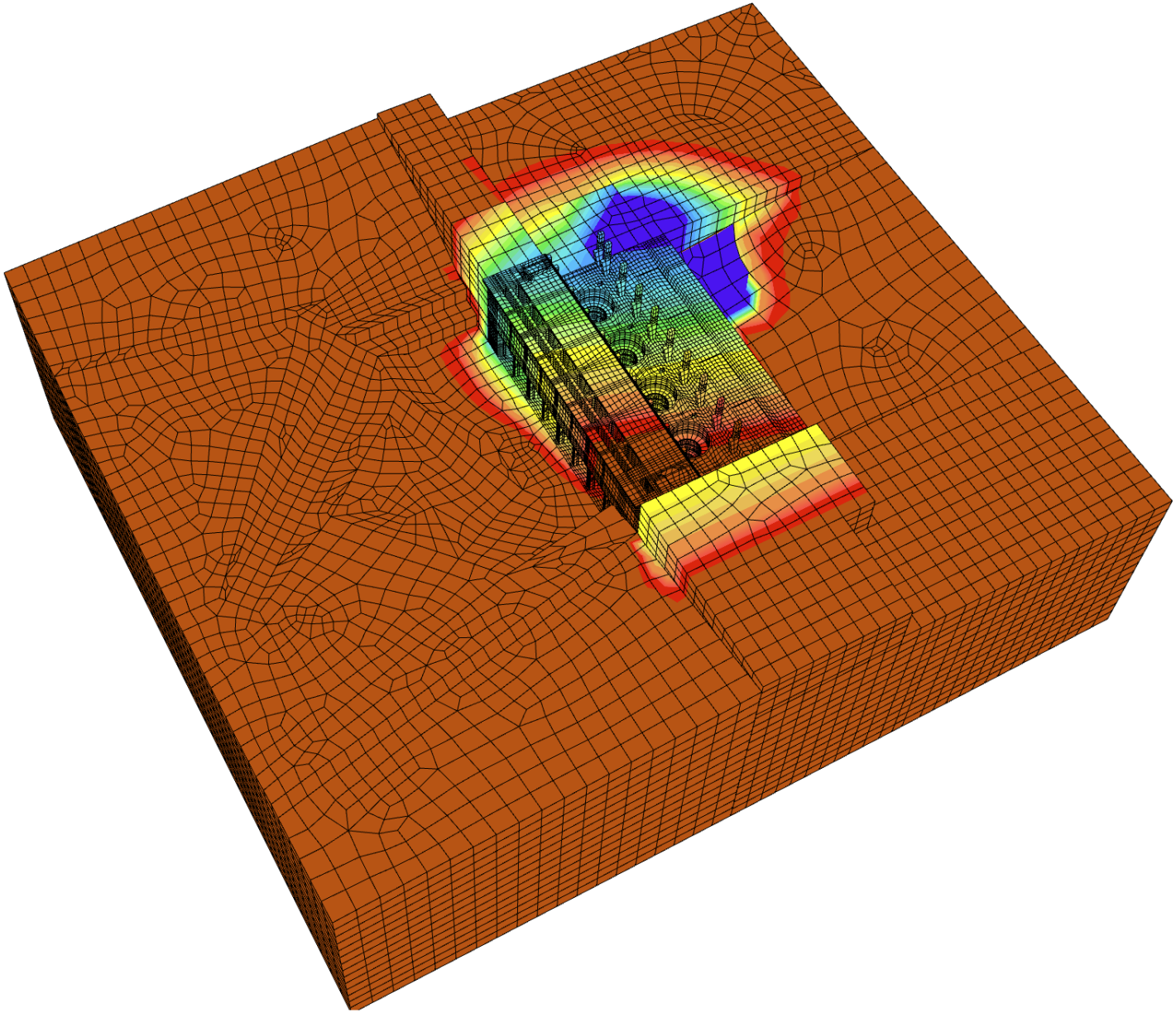


Рисунок 6.1. МКЭ модель процесса компенсационного нагнетания в ПВК ZSoil. Общий вид

6.2. Методика оптимизационных расчетов на основе несимметричных форм распределения объемов компенсационного раствора

Данный вид расчетов предполагает следующий алгоритм параметрического описания распределения объемов компенсационного раствора по площади манжетного поля.

1. Выбирается определенное количество манжет (порядка 5–9 шт., которые обозначаются по типу *X1…X9)*, как видно на рисунках 6.2.1–6.2.2, объемы компенсационного раствора в этих манжетах принимаются в качестве варьируемых факторов.
2. Расходы в промежуточных манжетах вычисляются по сплайновой интерполяции второго порядка.

На первом этапе за средний уровень варьирования принимается проектный расход в манжетах *X1…X9*, и назначается определенный интервал варьирования для всех факторов, например, порядка ±30 % от среднего расхода. На втором этапе, в зависимости от полученных результатов, интервал варьирования каждого фактора может уточняется, в том числе смещаться ассиметрично или пристыковываться к первоначальному. Например, на первом этапе может использовался интервал варьирования кодированного значения фактора от 0,7 до 1,3, а на втором этапе от 1,3 до 2,5.

Таким образом проведена оптимизация проектного распределения компенсационного раствора (рисунок 6.2.1), а также дополнительного холмообразного распределения (рисунок 6.2.2).

Заметим, что результаты расчёта для среднего уровня варьирования всех факторов не эквивалентны проектным расчетам [2.18], потому что оптимизационные расчеты выполняется на откалиброванной МКЭ-модели по результатам мониторинга за весь предшествующей период и с учетом накопленных инъекционных объемов на всех ярусах манжетных колонн за период с начала компенсационного нагнетания.

Более подробно методика оптимизационных расчетов на основе нерегулярных форм распределения объемов компенсационного раствора рассмотрена в [2.19].

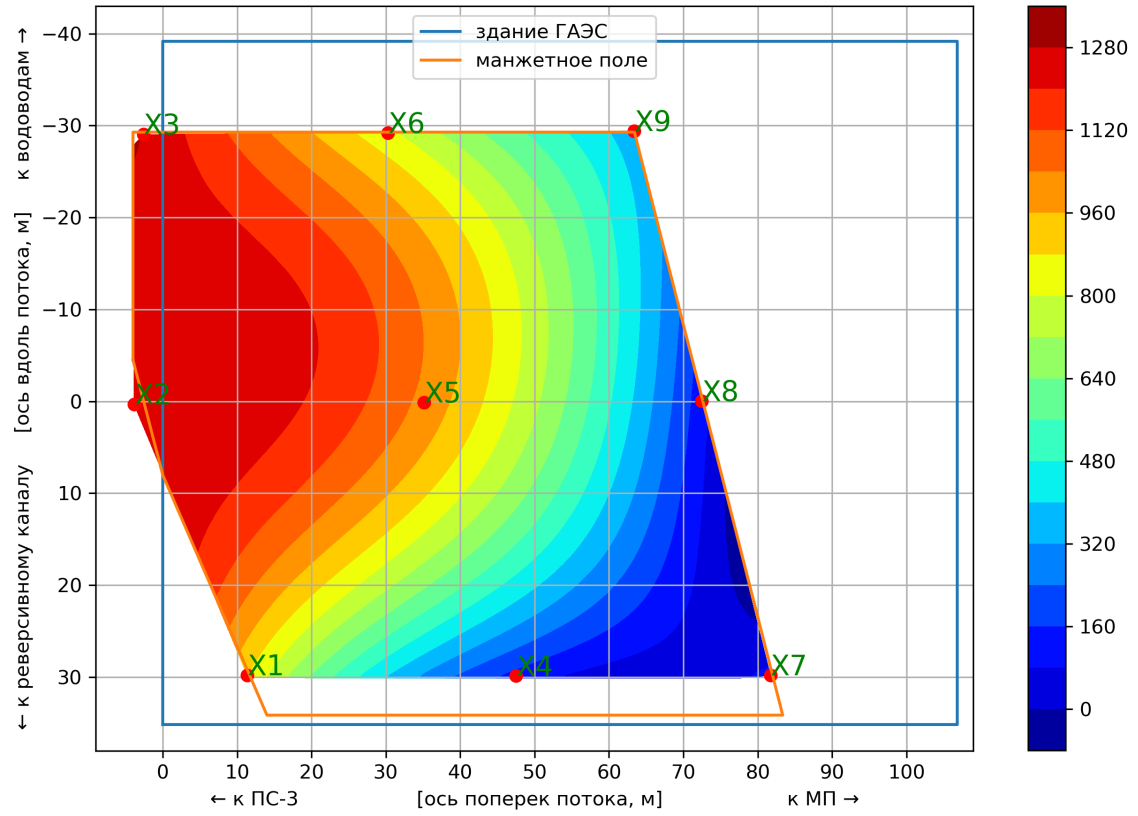


Рисунок 6.2.1. Оптимизированная схема проектного распределения компенсационного нагнетания, параметризованная с помощью 9 параметров

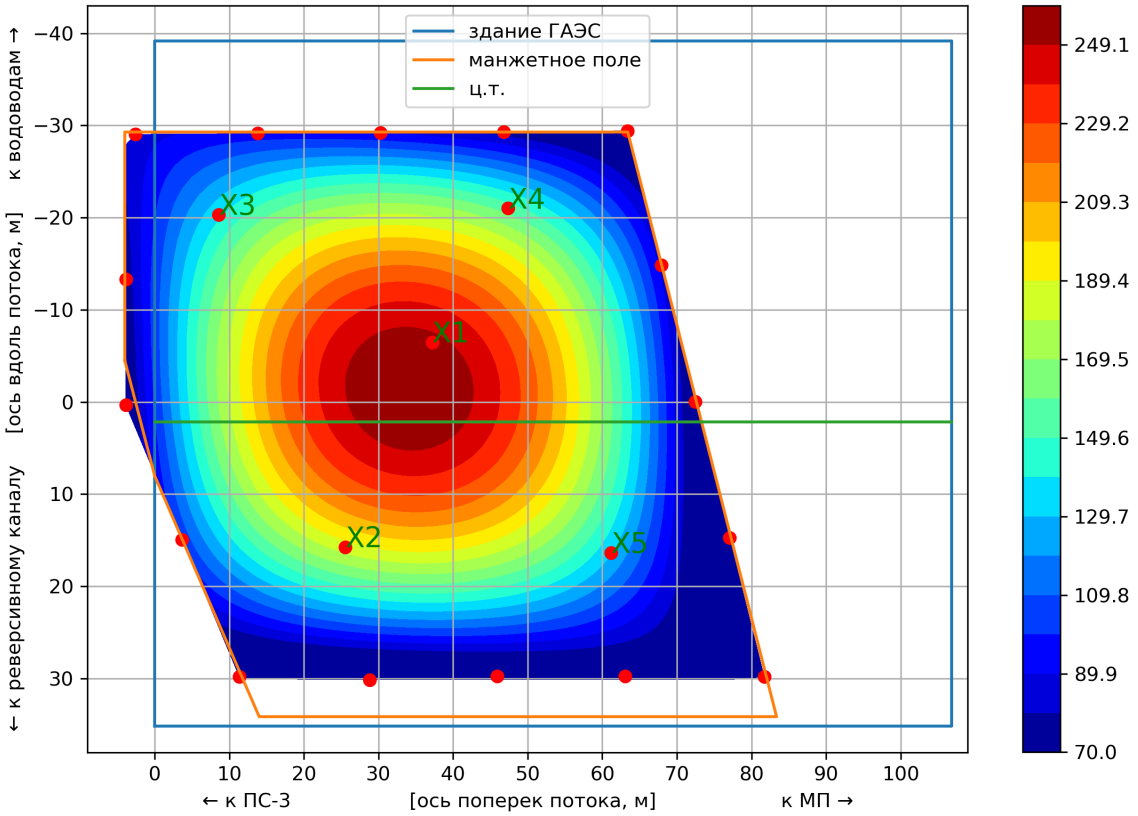


Рисунок 6.2.2. Оптимизированная схема холмообразного распределения компенсационного нагнетания, параметризованная с помощью 5 параметров

6.3. Методика оптимизационных расчетов на основе симметричных форм распределения объемов компенсационного раствора

В качестве регулярных форм распределения объемов компенсационного раствора рассмотрены сферические, конические и круговые распределения, представленные на рисунках 6.3.1–6.3.3.

Распределения данного типа создают эффект сосредоточения действия подъемной силы: во-первых, за счет ограничения площади распределения, во-вторых, за счет концентрации объемов компенсационного раствора в центре распределения.

Как представляется, наиболее целесообразная область применения распределений данного типа – оказание корректирующих воздействий на подъем, при этом распределение следует проектировать с учетом положения центра тяжести здания и необходимого характера корректирующего воздействия.

Более подробно методика оптимизационных расчетов на основе регулярных форм распределения объемов компенсационного раствора рассмотрена в [2.19].

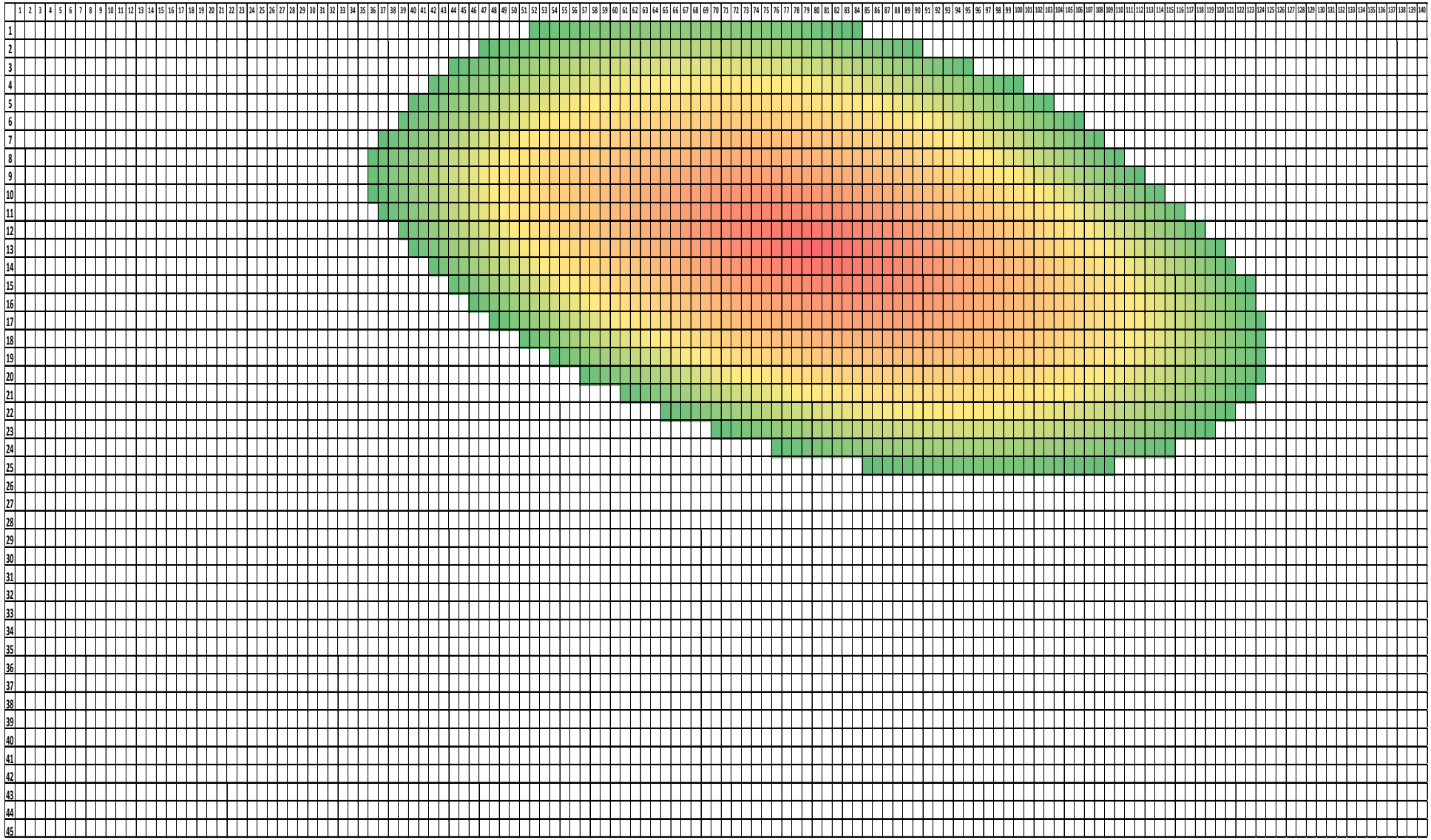


Рисунок 6.3.1. Схема сферического распределения компенсационного нагнетания

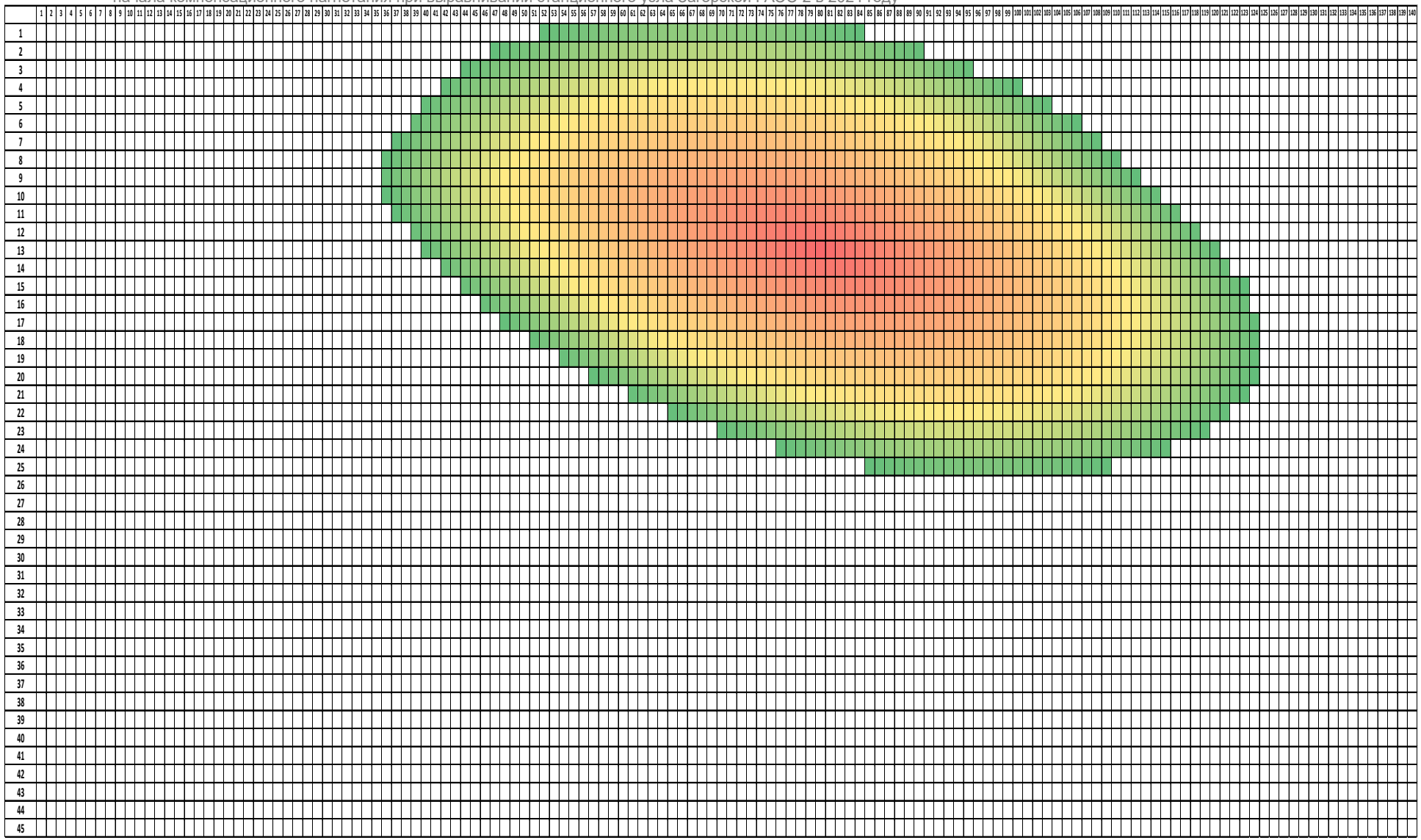


Рисунок 6.3.2. Схема конического распределения компенсационного нагнетания

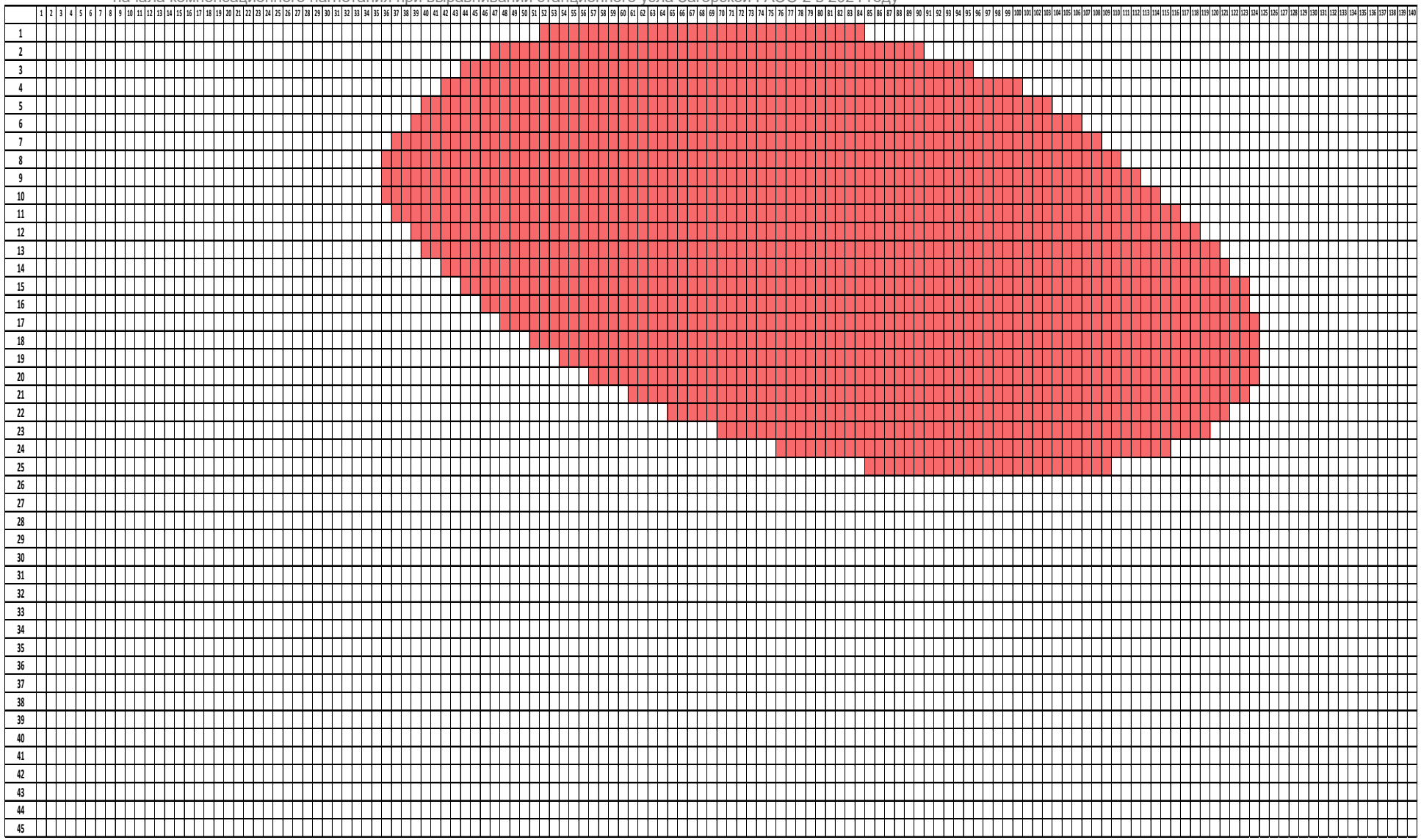


Рисунок 6.3.3. Схема кругового распределения компенсационного нагнетания

6.4. Методика оптимизационных расчетов на основе генеративных форм распределения объемов компенсационного раствора

Генеративной формой распределения объемов компенсационного раствора в настоящей работе называется форма, не заданная изначально, а определенная непосредственно в ходе оптимизационного расчета. В этом заключается отличие генеративной формы от предварительно заданных форм, параметризованных с помощью сравнительно небольшого количества факторов, рассмотренных выше в разделах 6.2–6.3 (несимметричные криволинейные поверхности, полученные сплайновой аппроксимаций второго порядка по 5-9 параметрам, симметричные поверхности сферических, конических и круговых распределений).

Для описания генеративной формой распределения требуется гораздо большее количество факторов, чем для параметрического описания предварительно заданной формы.

На рисунке 6.4.1 представлен рассматриваемый способ описания распределения компенсационного раствора с учетом представительного множества варьируемых факторов:

1. Выбирается достаточно большое количество манжет (которые обозначаются по типу *X1…X54,* как видно на рисунке 6.4.1), объемы компенсационного раствора в этих манжетах принимаются в качестве варьируемых факторов.
2. Расходы в промежуточных манжетах вычисляются по сплайновой интерполяции второго порядка.
3. Учитывая большое количество зон, в любом сечение возможно учет несколько локальных экстремумов распределения объемов компенсационного раствора, что создает возможность определения в ходе оптимизационного расчета новой формы распределения объемов компенсационного раствора, более точно учитывающих сложный корытообразный профиль фундаментной плиты.

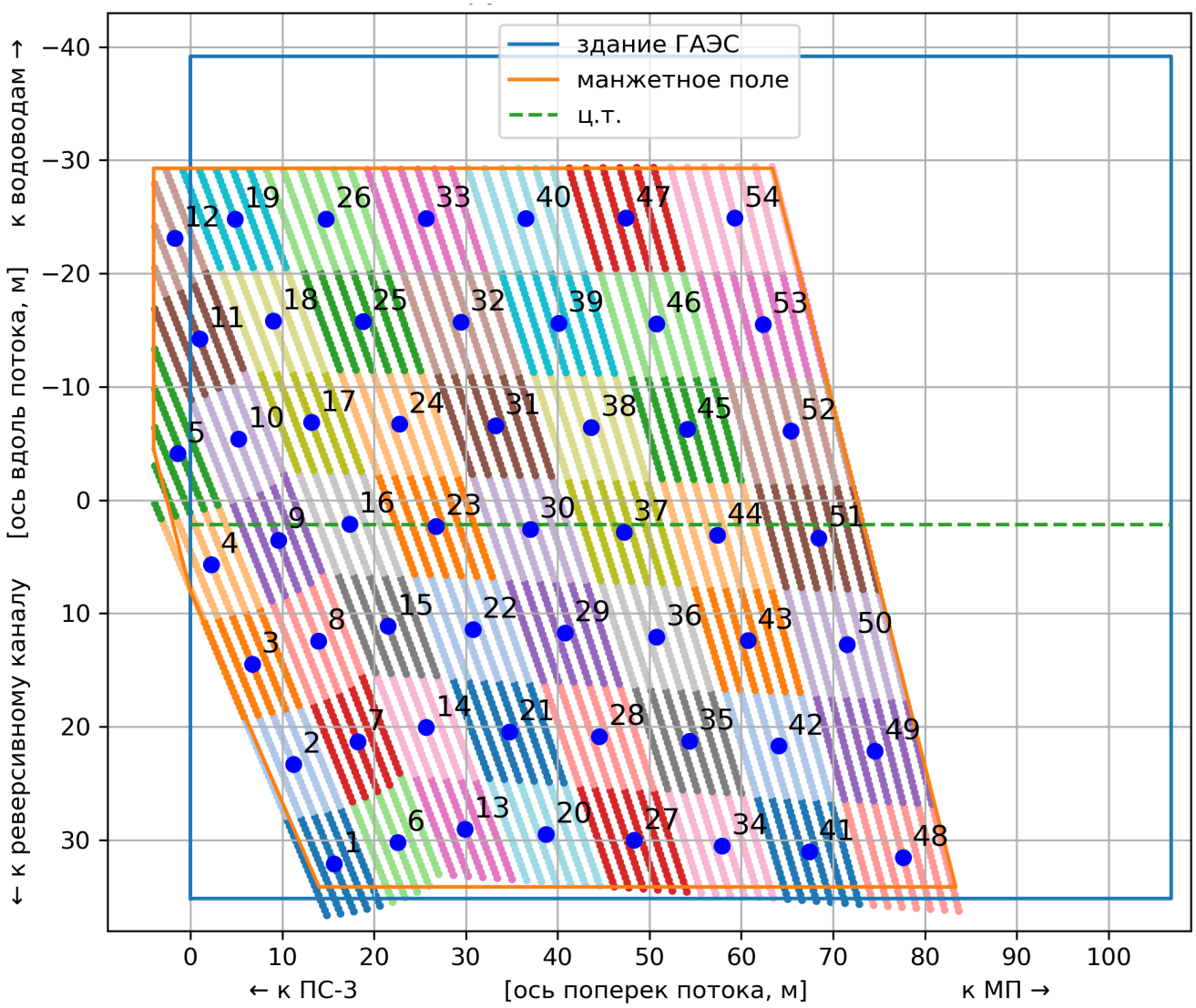


Рисунок 6.4.1. Схема параметризации объемов компенсационного раствора для генеративного поиска формы распределения.

7. Разработка сменных заданий

Представленные в разделе 6 семейства оптимальных распределений объемов компенсационного нагнетания являются основой для формирования 15 комплектов сменных заданий для 3 яруса манжетных колонн. Сменные задания регламентируют последовательность нагнетаний, объемы нагнетаний в каждую манжету, скорость закачки компенсационного раствора.

При формировании комплектов сменных заданий решается задача равномерного формирования заданного распределения инъекционных объемов под зданием ГАЭС с учетом технологических особенностей процесса нагнетания.

Сменные задания учитывают принятую на сегодняшний день технологию производства работ, наличное количество насосов, а также технологические ограничения по подключению насосов и по объёму инъектирования в каждую манжету.

При разработке сменных заданий учитываются факты выхода из строя некоторых манжетных колонн и обеспечивается корректировка распределения путем перераспределения выпадающих объемов на смежные манжетные колонны. Перераспределение выполняется в первую очередь в поперечном направлении по принципу домино: вначале выпадающий объем добавляется к ближайшим работоспособным манжетным колоннам по обе стороны, если при этом превышается максимальный объем инъектирования в манжету, то величина превышения добавляется к следующему ряду манжетных колонн, и так далее. В зонах, где перераспределения в поперечном направлении недостаточно, проводится распределение в продольном направлении по аналогичному принципу.

По заданию Заказчика компенсационное нагнетания на ярусе 3 предусмотрено кустовым способом при размере куста 5 манжет. Схема кустов представлена на рисунке 7.1.

Непосредственно сменные задания регламентируют:

- последовательность проведения инъекций в каждый куст с помощью одностороннего пакера с учетом координации работ между манжетными колоннами;
- объем нагнетания в каждую куст с помощью одностороннего пакера с точностью до одного литра компенсационного раствора;
- скорость нагнетания в каждую скважину с точностью до литра в минуту;
- продолжительность выдержки между инъекциями с точностью 0,5 часа;
- взаимную увязку сменных заданий для обеспечения равномерности формирования объемных включений компенсационного раствора под зданием ГАЭС, а также с учетом дополнительных технологических данных по схеме переключения насосов и т.п.

Разработанные сменные задания в количестве 15 комплектов в соответствии с таблицей 7.1 представлены в приложениях Б–Д (тома 2–5).

Таблица 7.1.

Сводные данные по сменным заданиям

№ п/п	Обозначение	Объем	Примечание
1	ЯЗ-Н3-П1	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 4-37, 4-39, 4-41, 4-43 и 4-45 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
2	ЯЗ-Н3-П2	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 4-36, 4-38, 4-40, 4-42 и 4-44 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
3	ЯЗ-Н3-П3	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 4-37, 4-39, 4-41, 4-43 и 4-45 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
4	ЯЗ-Н3-П4	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 4-36, 4-38, 4-40, 4-42 и 4-44 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
5	ЯЗ-Н4-П1	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 4-37, 4-39, 4-41, 4-43 и 4-45 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
6	ЯЗ-Н4-П2	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 4-36, 4-38, 4-40, 4-42 и 4-44 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
7	ЯЗ-Н4-П3	АПгрунд 150 м³	Уменьшен суммарный объем инъекций. Исключены нагнетания в МК 4-37, 4-39, 4-41, 4-43 и 4-45 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
8	ЯЗ-Н4-П4	АПгрунд 200 м³	Увеличен суммарный объем инъекций. Исключены нагнетания в МК 4-38, 4-40, 4-42 и 4-44 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
9	ЯЗ-Н5-П1	АПгрунд 250 м³	Увеличен суммарный объем инъекций. Исключены нагнетания в МК 4-37, 4-39, 4-41, 4-43 и 4-45 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
10	ЯЗ-Н5-П2	АПгрунд 300 м³	Увеличен суммарный объем инъекций. Исключены нагнетания в МК 4-38, 4-40, 4-42 и 4-44 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
11	ЯЗ-Н5-П3	АПгрунд 300 м³	Начальный В/Т в указаниях СЗ уменьшен до 0,70. Исключены нагнетания в МК 4-37, 4-39, 4-41, 4-43 и 4-45 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН

№ п/п	Обозначение	Объем	Примечание
12	ЯЗ-Н5-П4	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 3-8, 3-14, 3-21, 3-36 в связи с выходом их из строя. Исключены нагнетания в МК 4-38, 4-40, 4-42 и 4-44 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
13	ЯЗ-Н6-П1	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 3-8, 3-14, 3-21, 3-36 в связи с выходом их из строя. Исключены нагнетания в МК 3-39, 3-41, 3-43 и 3-45 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
14	ЯЗ-Н6-П2	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 3-8, 3-14, 3-21, 3-36 в связи с выходом их из строя. Исключены нагнетания в МК 4-38, 4-40, 4-42 и 4-44 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН
15	ЯЗ-Н6-П3	АПгрунд 300 м³	Исключены нагнетания в МК 3-8, 3-14, 3-21, 3-36 в связи с выходом их из строя. Исключены нагнетания в МК 3-39, 3-41, 3-43 и 3-45 в рамках группировки МК со сравнительно малым объёмом КН

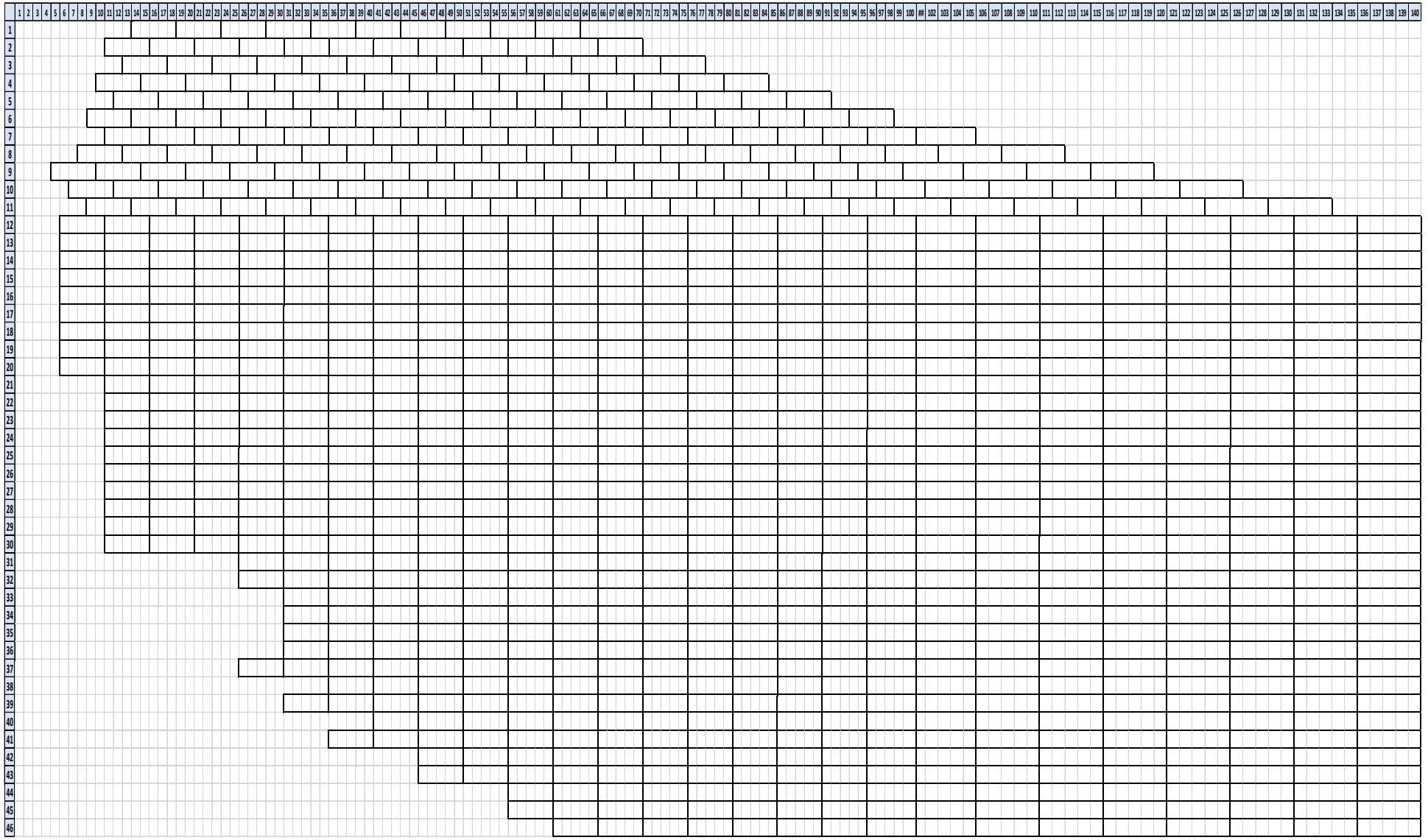


Рисунок 7.1. Схема распределения манжет по кустам для разработки сменных заданий на 3 ярусе.

8. Выводы и рекомендации

8.1. Выполнен анализ распределения проектных и фактических объемов инъектирования медленнотвердеющего компенсационного раствора в основание здания Загорской ГАЭС-2 за период с начала выполнения компенсационного нагнетания по настоящее время (раздел 4). Проектное распределение объемов инъектирования принято по данным [2.18]. К фактическим объемам по ярусам 8, 7, 6, 5, 4 применен поправочный коэффициент 0,88 на погрешность расходомеров. Суммарный объем инъектированного раствора составляет 75% от проектного объема 17 100 м^3.

8.2. Выполнен анализ результатов мониторинга подъема здания ГАЭС за период с начала выполнения компенсационного нагнетания по настоящее время (раздел 5). Эффективность компенсационного нагнетания на ярусах 5, 4, 3 повысилась, по сравнению с началом работ на ярусах 8, 7, 6 ярусах.

8.3. Актуализирована пространственная конечно-элементная модель в постановке «здание ГАЭС – основание» отражающая поэтапный процесс компенсационного нагнетания (раздел 6). В модель внесены данные по инъекциям на ярусах 8, 7, 6, 5, 4 и выполнена калибровка по результатам мониторинга.

8.4. Выполнен анализ оптимизированных вариантов распределения объемов компенсационного раствора на основе теории планирования эксперимента по планам второго порядка Бокса-Бенкена с использованием несимметричных, симметричных и генеративных форм распределения.

8.5. На основе семейства оптимальных распределений разработаны сменные задания в количестве 15 комплектов на суммарный объем компенсационного раствора 4200 м^3 (раздел 7, приложения Б–Д). Сменные задания учитывают актуальную технологию производства работ, наличное количество насосов, а также технологические ограничения по подключению насосов и по объёму инъектирования в каждую манжету. Учитываются факты выхода из строя некоторых манжетных колонн, обеспечивается корректировка текущих сменных заданий путем перераспределения выпадающих объемов.

Приложение А. Техническое задание

Приложение № 1
к договору № П-33/13-129
от 15.08.2024

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ
на выполнение работ по теме:
«Выполнение расчетов при распределении инъекционных объемов компенсационного нагнетания манжетных колонн 3 яруса с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов за период с начала компенсационного нагнетания при выравнивании станционного узла Загорской ГАЭС-2 в 2024 году»

1.1. Наименование работ

Выполнение расчетов при распределении инъекционных объемов компенсационного нагнетания манжетных колонн 3 яруса с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов за период с начала компенсационного нагнетания при выравнивании станционного узла Загорской ГАЭС-2 в 2024 году

1.2. Цель выполнения работ

Целью работы является оптимизация распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания на ярусе 3 манжетных колонн с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов на предыдущих ярусах манжетных колонн за период с начала работ по компенсационному нагнетанию. Работа является составной частью научно-технического сопровождения процесса компенсационного нагнетания и направлена на обеспечение эффективности компенсационного нагнетания путем учёта фактических данных, полученных по ходу проведения работ. В ходе выполнения работы допускается корректировка распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания в порядке научно-технического сопровождения, как предусмотрено указаниями рабочей документации.

Непосредственной задачей работы является разработка расчетного обоснования для оптимизированных сменных заданий на компенсационное нагнетание в количестве 15 комплектов на 45 инъекционных манжетных колонн 3 яруса с количеством от 63 до 140 манжет в каждой манжетной колонне и объемом инъекций 250 м3 на один комплект по расчётным сценариям с целью получения максимально безопасного вертикального перемещения здания станции.

1.3. Существующее положение

В настоящее время завершено нагнетание по 4 ярусам инъекционных работ (8-4 ярусы), показавшее соответствие расчетных показателей фактическим. Следующим этапом является нагнетание выравнивающих инъекционных составов 3 яруса. Для наиболее эффективного и безопасного выполнения работ по выравниванию здания ГАЭС, необходимо выполнить в процессе инъектирования выравнивающих составов третьего яруса ряд специализированных расчётов. Расчёты выполняются по мере выполнения инъекционных работ.

Таблица 1. Перечень объектов Заказчика

№ п/п	Наименование объекта	Расположение объекта *(место производства работ)*	Наименование основного средства (в отношении которого выполняются работы)	Примечания
1	2	3	4	5
1.	*Здание ГАЭС*	*Загорская ГАЭС-2*	*Основание здания ГАЭС*	

1.4. Информация, которая должна быть учтена при выполнении Договора (в том числе перечень ресурсов, услуг и документов, предоставляемых заказчиком на этапе исполнения Договора)

Отчёты по 7, 8, 5 и 4 ярусам нагнетания по теме: «Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы. Техническое сопровождение процесса восстановления высотного положения здания станционного узла Загорской ГАЭС-2».

Фактически выполненные инъекционные работы на дату выдачи технического задания.

Данные мониторинга высотного положения бетонных сооружений станционного узла Загорской ГАЭС-2 на дату выдачи технического задания

На период выполнения работ Заказчик обеспечивает подключение подрядчика к системе SODIS, предоставляющей online -доступ к актуальным результатам мониторинга по мере поступления данных.

Дополнительные исходные данные со стороны Заказчика предоставляются по письменному запросу Подрядчика.

1.5. Иные требования и сведения общего характера

Нет

2. Требования к работам

2.1. Требования к объемам и срокам выполнения работ

2.1.1. Требования к видам и объемам работ

Оптимизация распределения инъекционных объемов компенсационного нагнетания на ярусе 3 манжетных колонн выполняется путем сопоставления сценарных вариантов распределения инъекционных объемов на математической модели.

Подрядчик самостоятельно составляет рациональные сценарные варианты распределения инъекционных объемов на основе своего геотехнического опыта.

Математическое моделирование компенсационного нагнетания выполняется методом конечных элементов с учетом явления упрочнения грунта при компенсационном нагнетания по модели Hardening Soil.

Таблица 2. Перечень и объем выполняемых работ

№ п/п	Наименование работ / этапа работ	Единица измерения	Количество
1	2	3	4
1.	Пояснительная записка к сменным заданиям. Сменные задания (СЗ) в количестве до 15 комплектов, включающих СЗ на 45 инъекционных манжетных колонн 3 яруса с количеством от 63 до 140 манжет в каждой манжетной колонне и объемом инъекций 250 м3 на один комплект.	Комплект	15

2.1.2. Требования к срокам выполнения работ

Работы выполняются в соответствии с Календарным графиком (Приложение № 2 к Договору).

3

2.2. Требования к качеству работ

Таблица 3. Требования к качеству работ

Наименование работ/этапа работ: Выполнение расчетов при распределении инъекционных объемов компенсационного нагнетания манжетных колонн 3 яруса с учетом результатов мониторинга подъема здания ГАЭС и накопленных инъекционных объемов за период с начала компенсационного нагнетания при выравнивании станционного узла Загорской ГАЭС-2 в 2024 году

№ п/п	Наименование параметра	Требование заказчика
1	2	3
1.	**Требования к выполнению работ**	
1.1.	**Общие требования к выполнению работ**	
1.1.1.		При проведении расчётов учесть, что расчёты производятся в условиях сопровождения инъекционных работ. Исходные данные для расчётов формируются по мере выполнения инъекционных работ
1.2.	**Требования к организации работ**	
1.2.1.		Разработать программу и методику выполнения расчётов в соответствии с возможностями сроков получения исходных данных по мере выполнения инъекционных работ
1.2.2.		Уточнить и согласовать с эксплуатационными и оперативными службами АО «Загорская ГАЭС-2»
1.3.	**Требования к применяемым при выполнении работ оборудованию, материалам, технологиям, программно-аппаратным средствам**	
1.3.1.	Программно-аппаратное средство ZSoil	Расчеты производятся по модели Hardening Soil
1.4.	**Требования к контролю качества работ и материалов**	
1.4.1.		СНиП 3.07.02-87 «Гидротехнические морские и речные сооружения»
1.4.2.		СТО 70238424.27.140.035-2009 Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования
1.4.3.		Материалы ПД№1938-40-094 и РД на выполнение инъекционных работ
1.5.	**Требования к персоналу подрядчика**	
1.5.1.		нет
1.6.	**Требования к безопасности работ и охране труда**	
1.6.1.		Приказ Минтруда России от 17.12.2020 N 922н "Об утверждении Правил по охране труда при проведении водолазных работ" (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2020 N 61927)
2.	**Требования к результатам работ**	
2.1.	**Общие требования к результатам работ**	

2.1.1.	Отчётные материалы	Подрядчик передаёт Заказчику пояснительную записку к сменным заданиям и сменные задания (СЗ) в количестве 15 комплектов, включающих СЗ на 45 инъекционных манжетных колонн 3 яруса с количеством от 63 до 140 манжет в каждой манжетной колонне и объемом инъекций 250 м3 на один комплект.
2.1.2.	Передача данных	Сменные задания направляются Заказчику до начала инъекционных работ по каждому подэтапу
2.2.	**Требования к техническим и функциональным характеристикам объекта, которые должны быть достигнуты в результате выполнения работ, включая гарантируемые показатели**	
2.2.1.	Безопасность	Инъекционные расчёты выполняются под контролем комплексного мониторинга напряженно-деформированного состояния здания ГАЭС, организуемого Заказчиком
2.3.	**Требования к порядку приемки результатов работ**	
2.3.1.		Отчётные материалы передаются Заказчику в 4 (четырех) распечатанных экземплярах и в 1-ом (одном) экземпляре в электронном виде.
2.4.	**Требования к оформлению документации**	
2.4.1.		Электронная версия предоставляется в формате PDF, а также в форматах Microsoft Word (текстовая документация), Microsoft Excel (табличная документация), DWG (чертежи в программах AutoCAD, Nanocad и совместимых), позволяющих редактировать указанные документы. Экземпляр, выдаваемый на электронном носителе, является адекватным экземпляру, выполненному на бумаге.

ЗАКАЗЧИК:
Генеральный директор
АО «Институт Гидропроект»

_____ Е.Н. Беллендир

ПОДРЯДЧИК:
Генеральный директор
ООО «Сигма Тау»

_____ А.Н. Симутин