



М. А. Плаксин,

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Пермский филиал);
Пермский государственный национальный исследовательский университет*

ПРОПЕДЕВТИКА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ШКОЛЬНОЙ ИНФОРМАТИКЕ. СЕТЕВОЙ ГРАФИК

Аннотация

Описываются понятия «сетевой график», «PERT-диаграмма», «критический путь», «диаграмма Ганта». В качестве примера дается разбор задания из конкурса «ТРИЗформашка-2015».

Ключевые слова: информатика, средняя школа, начальная школа, методика обучения, сетевой график, PERT, PERT-диаграмма, критический путь, диаграмма Ганта, параллельные вычисления, пропедевтика, ТРИЗформатика, ТРИЗформашка.

Контактная информация

Плаксин Михаил Александрович, канд. физ.-мат. наук;

доцент кафедры информационных технологий в бизнесе Пермского филиала Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»; *адрес:* 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38; *телефон:* (342) 205-52-50;

доцент кафедры математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного национального исследовательского университета; *адрес:* 614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15; *телефон:* (342) 239-67-72;

e-mail: mapl@list.ru

M. A. Plaksin,
National Research University Higher School of Economics, Perm Branch;
Perm State National Research University

PROPAEDEUTICS OF PARALLEL COMPUTING IN SCHOOL INFORMATICS. ACTIVITY NETWORK

Abstract

There is the description of the conceptions "activity network" ("project network", "diagram network"), "PERT", "PERT diagram", "critical path", "Gantt diagram" ("Gantt Chart", "Gant diagram", "Gant Chart"). As an example, the investigation of task from the contest "TRIZformashka 2015" is given.

Keywords: informatics, secondary school, primary school, teaching methods, activity network, project network, diagram network, PERT, PERT diagram, critical path, Gantt diagram, Gantt Chart, Gant diagram, Gant Chart, parallel computing, propaedeutics, TRIZformatics, TRIZformashka.

Современный этап развития computer science связан с массовым распространением параллелизма вычислений на всех уровнях (многоядерные процессоры, многомашинные кластеры, многопроцессорные ЭВМ). Это делает актуальным включение пропедевтики параллельного программирования в школьный курс информатики.

В рамках работ над «пермской версией» пропедевтического курса информатики (авторский коллектив: М. А. Плаксин, Н. Г. Иванова, О. Л. Русакова; рабочее название курса «ТРИЗформатика») [7, 8] разработка данной тематики началась в 2013 году. Эффективной площадкой для этого выступил конкурс «ТРИЗформашка» — ежегодный межрегиональный интернет-конкурс по информатике, системному анализу и ТРИЗ (теории решения изобретательских задач) для школьников и студентов [3–6, 9]. В марте 2017 года конкурс состоялся в 17-й раз. Возраст участников — от первого класса школы до четвертого курса вуза. Среднее количество команд — около 100 (рекордное — 202). География конкурса — от Владивостока до Риги. Сайт конкурса: <http://www.trizformashka.ru>

В процессе подготовки конкурса «ТРИЗформашка» были определены типы задач, направленных на освоение базовых понятий параллельных вычислений, и придуманы по несколько задач этих типов. Одним из таких типов являются задачи на сетевой график.

Вообще говоря, **аппарат сетевых графиков** [10, 11] был создан не для программирования, а для управления проектами. **Причины его включения в курс информатики состоят в следующем:**

- Во-первых, в рамках пропедевтического курса мы занимаемся не узко вопросами программирования, а организацией совместной деятельности любых исполнителей при выполнении любых алгоритмов. В том числе совместной деятельности людей, реализующих проекты.
- Во-вторых, сетевые графики имеют много общего с параллельными формами представления алгоритмов [1, 2, 6]. Более того, в нашей статье [6] для решения задачи на ярусно-параллельную форму алгоритма нам было необходимо одно важное понятие, связанное с сетевым графиком, — критический путь (хотя в той же работе [6] мы на этом внимания не акцентировали).
- В-третьих, сетевые графики — это инструмент планирования. А при организации совместной деятельности как людей, так и устройств планирование является одним из важнейших моментов.

Далее приводятся текст задачи на сетевой график из конкурса «ТРИЗформашка-2015», теоретический материал (описание понятий «сетевой график», «диаграмма Ганта», «критический путь») и разбор задачи конкурса 2015 года.

Что-нибудь получится! (задача из конкурса «ТРИЗформашка-2015»)

Дана схема процесса строительства (рис. 1).

Каждый прямоугольник обозначает какую-то работу, которая должна быть выполнена в ходе строительства. Стрелки определяют порядок выполнения работ (какая работа должна быть выполнена раньше, какая — позже).

Каждую работу выполняет одна бригада (нельзя выполнение одной работы поручить сразу нескольким бригадам).

Для каждой работы указано название и номер (номер служит только для удобства обозначения).

Внизу в квадратных скобках указано количество недель, которое необходимо бригаде для того, чтобы выполнить эту работу.

Требуется:

1. Изобразить (схематично) сооружение, которое будет построено.
2. Определить, сколько недель потребуется для строительства, если работать будет только одна бригада. Ответ обосновать.
3. Определить, за какое минимальное время может быть завершено строительство, если не будет ограничения на рабочую силу. Ответ обосновать.
4. Как повлияет на минимальное время строительства сокращение срока строительства северного бастиона с пяти недель до четырех?
5. Как повлияет на минимальное время строительства увеличение срока строительства западного бастиона с трех недель до четырех?

6. Определить, сколько недель потребуется для строительства, если работать будут восемь бригад. Ответ обосновать.
7. Изобразить (схематично), как будет выглядеть стройка через девять недель после начала строительства, если работать будут пять бригад.
8. Определить, с какой стороны происходит подвоз строительных материалов. Ответ обосновать.
9. Каково минимальное количество бригад, которые способны завершить строительство в минимальное время? Ответ обосновать.

Замечания:

1. Место строительства пересекает река, текущая с северо-запада на юго-восток.
2. Стороны света обозначаются первыми буквами: С — север, Ю — юг, З — запад, В — восток.
3. Бастион имеет форму пятиугольника, у которого четыре наружные стороны представляют собой стены, а пятая — внутренняя — открыта.

Перед продолжением чтения читателю рекомендуется самостоятельно решить предложенную задачу.

Сетевой график, критический путь, PERT, диаграмма Ганта

Сетевой график отображает взаимозависимость работ, составляющих некоторый проект. По способу представления этой зависимости сетевые графики делятся на два вида:

- в одном из них (который и используется в задании конкурса «ТРИЗформашка») работы представляются вершинами графа, а дуги показывают очередность работ;



Рис. 1. Схема строительства

- в другом работы изображаются дугами, а вершины — это события, отмечающие начало/конец той или иной работы (другая трактовка: вершины отображают состояние проекта до и после выполнения соответствующей работы).

Если добавить на сетевой график информацию о продолжительности отдельных работ, можно определить время начала/окончания каждой работы и продолжительность всего проекта.

При оценке продолжительности проекта возникает следующее важное понятие — **критический путь**.

К финишной точке проекта ведут несколько путей. И пройти их надо все (выполнить все лежащие на этих путях работы). Выполнение разных работ требует разного времени. Соответственно, разного времени требует прохождение каждого пути. Имеет смысл выделить самый долгий путь, требующий максимального времени. Дело в том, что указанная нами продолжительность каждой работы — нормативная, планируемая, а на практике всегда возможны задержки по тем или иным причинам. Задержки на «быстрых» путях могут и не повлиять на окончание всего проекта, здесь есть резерв времени. Но задержка на самом долгом пути автоматически означает задержку окончания всего проекта. Такой путь и называется критическим. Он требует особого внимания со стороны руководства проекта. Заметим, что по мере продвижения работ по проекту критический путь может меняться. Например, пусть в начале пути стоит продолжительная работа. Мы сосредоточим на ней много работников и ее выполним. Но сделаем это за счет задержки работ на других путях. Тогда критическим может стать другой путь.

Немного истории. Появление сетевых графиков — побочный результат космической гонки, начатой 4 октября 1957 года с запуска Советским Союзом первого искусственного спутника Земли. В США грянул так называемый спутниковый кризис. Несмотря на индустриальную мощь, преимущества, полученные в результате мировых войн, вывоза в США германских ракетных технологий и ученых, включая ведущих ракетостроителей, оказалось, что Штаты опять (как и в случае с водородной бомбой) отстают от СССР. Кроме того, теперь никто уже не сомневался, что в случае ядерного нападения на Советский Союз, планы которого США разрабатывали начиная с 1945 года, американцам не удастся отсидеться за океаном и они получат ответный удар по своей территории. Среди мер, предпринятых администрацией президента США Дуайта Эйзенхауэра (бывшего главнокомандующего американскими войсками в Европе), были создание в 1958 году Агентства перспективных исследований (ARPA), Национального аэрокосмического агентства (NASA), форсирование работ по созданию межконтинентальной баллистической ракеты «Поларис», предназначенной для базирования на подводных лодках и запуска из-под воды. Кстати, именно ARPA финансировало работы по созданию компьютерных сетей (сети ARPANET, которая стала прародительницей Интернета), протоколов TCP/IP, одной из базовых версий ОС UNIX (так называемой BSD — Berkeley Software Distribution). Реализуемый корпорацией Локхид проект «Поларис» оказался настолько сложен, что для координации работ пришлось создать новую технику управления проектом, получившую название **PERT** — Program/Project Evaluation and Review Technique (методика анализа и оценки программ/проектов). Техника PERT использовала граф вида «работы — дуги, вершины — события». Однако в литературе и во

многих компьютерных системах часто любой сетевой график именуют **PERT-диаграммой**.

Сетевой график позволяет отследить взаимозависимость работ, для того он и создан. Но есть еще один важный для управления проектом вопрос, ответить на который по сетевому графику очень сложно. Это вопрос о совпадении различных работ по времени исполнения. Представьте себе, что в вашем проекте задействован один автомобиль и один водитель, а вам надо совершить несколько поездок. Понятно, что, если две поездки будут запланированы на одно и то же время, ваши планы будут нарушены. Для наглядного отображения времени каждой работы используется еще одна технология, предложенная в 1910 году американским инженером Генри Гантом — **диаграмма Ганта**.

Диаграмма Ганта строится следующим образом. Горизонтальная ось представляет собой ось времени. По вертикальной оси располагается список работ (вообще говоря, в произвольном порядке). Напротив каждой работы помещается полоса, начало которой совпадает с моментом начала работы, а конец — с моментом ее окончания. Стрелки соединяют предшествующую работу с последующей. Дополнительно цветом или штриховкой может быть выделен критический путь.

На рисунке 2 изображена диаграмма Ганта для ТРИЗформашкинского задания, построенная в системе GanttProject. Работы упорядочены таким образом, чтобы диаграмма «читалась» (в основном) сверху вниз. К сожалению, в качестве единицы времени GanttProject берет день, хотя по условиям задачи единицей времени является неделя. Это — ограничение системы, преодолеть которое не удалось. Штриховкой выделен критический путь, включающий в себя работы № 19, 18, 3, 4, 2, 7.

На диаграмме Ганта легко определить расположение времени разных работ друг относительно друга, в частности, совпадение времени нескольких работ. Зато зависимость между работами видна плохо: вертикальные стрелки отслеживать трудно, приходится постоянно обращаться к таблице в левой части диаграммы, в которой для каждой работы указаны ее предшественники и продолжительность.

Сетевой график и диаграмма Ганта удачно дополняют друг друга. По этой причине использовать их удобно вместе.

Существует достаточно много компьютерных систем, поддерживающих работу с сетевыми графиками и диаграммами Ганта. Продукт фирмы Microsoft называется MS Project и имеет несколько версий — от персональной («на одного») до корпоративной, для групповой разработки больших проектов. В качестве альтернативы MS Project предлагается несколько свободных систем, распространяемых на условиях лицензии GNU General Public License или схожих с ней, — OpenProj, ProjectLibre и др. Автор данной статьи предпочитает GanttProject.

Наиболее мощная отечественная разработка — система Spider Project. Она ориентирована на крупные проекты и стоит относительно дорого. Однако у системы существует учебная версия, которая обладает полными функциональными возможностями для управления проектами любых типов, но имеет количественные ограничения по размеру проекта: не более 40 работ. Это ограничение можно считать жестким с точки зрения крупных проектов, однако такого количества работ вполне достаточно не только для обучения, но и для практического решения небольших задач.

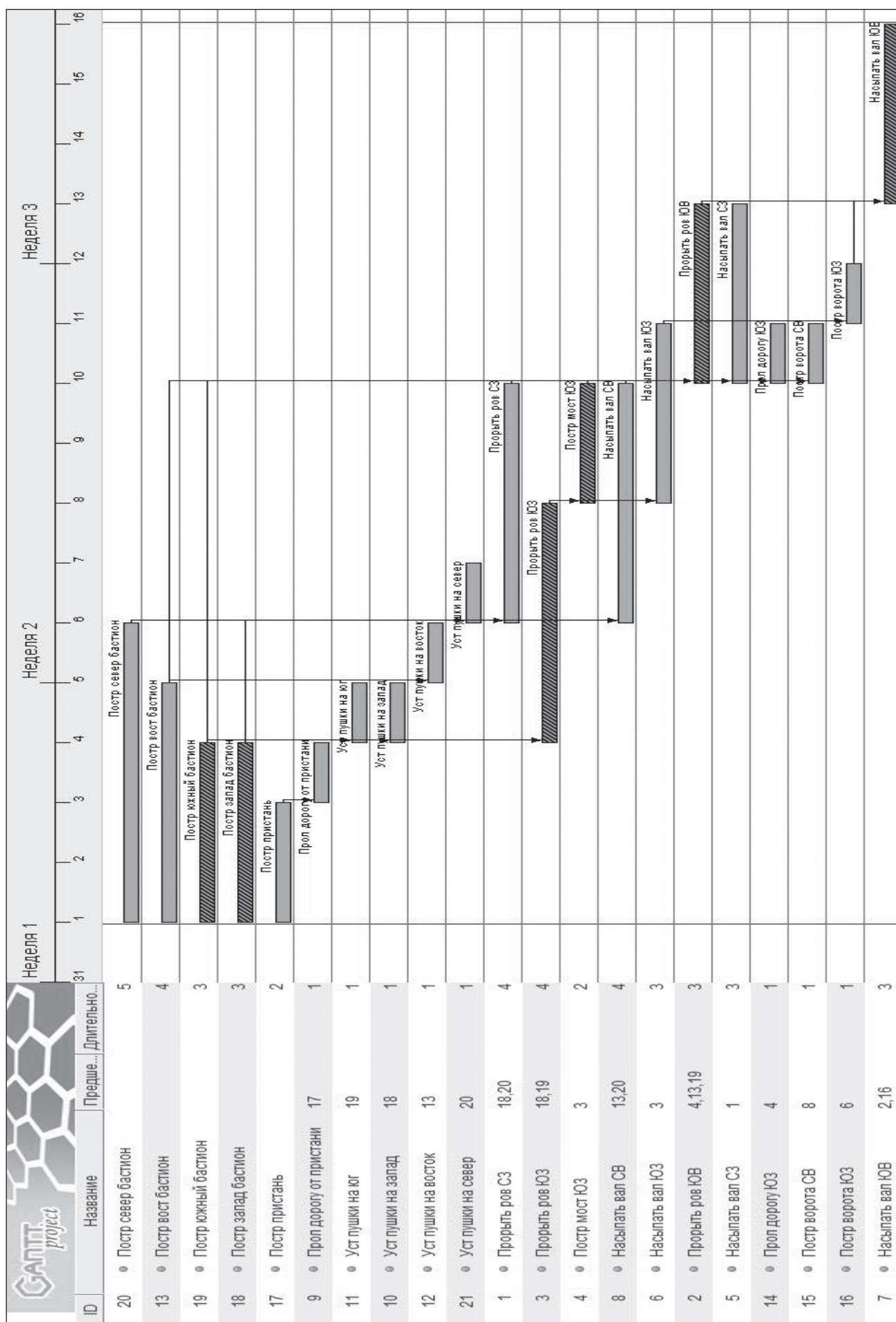


Рис. 2. Диаграмма Ганта

Литература, в которой описаны сетевые графики, PERT-диаграммы, критические пути и пр. весьма обширна. В качестве примера приведем книги [10, 11]. Содержание книги [10] соответствует названию серии, в которой она выпущена, — «для чайников»: материал изложен на предельно простых примерах. В книге [11] изложение гораздо сложнее, строже и обстоятельнее, это книга для профессионалов.

Разбор задачи «Что-нибудь получится!» конкурса «ТРИЗформашка-2015»

1. Изобразить (схематично) сооружение, которое будет построено.

Ответ представлен на рисунке 3.

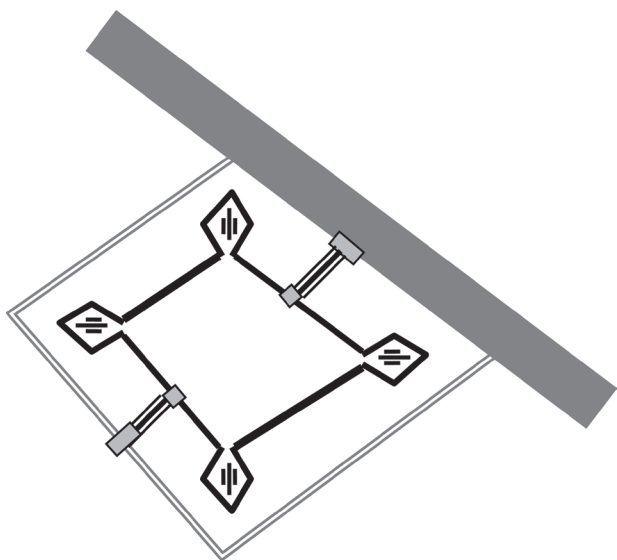


Рис. 3. Сооружение, которое будет построено

2. Определить, сколько недель потребуется для строительства, если работать будет только одна бригада. Ответ обосновать.

Ответ. Потребуется 51 неделя. Нужно сложить продолжительность всех работ.

3. Определить, за какое минимальное время может быть завершено строительство, если не будет ограничения на рабочую силу. Ответ обосновать.

Ответ. Минимальное время — 15 недель. Это длина критического пути:

- Построить южный бастион (3), Построить западный бастион (3).
- Прорыть ров ЮЗ (4).
- Построить мост ЮЗ (2).
- Прорыть ров ЮВ (3).
- Насыпать вал ЮВ (3).

4. Как повлияет на минимальное время строительства сокращение срока строительства северного бастиона с пяти недель до четырех?

Ответ. Никак. Строительство северного бастиона не лежит на критическом пути.

5. Как повлияет на минимальное время строительства увеличение срока строительства западного бастиона с трех недель до четырех?

Ответ. Увеличит на неделю. Строительство западного бастиона лежит на критическом пути.

6. Определить, сколько недель потребуется для строительства, если работать будут восемь бригад. Ответ обосновать.

Ответ. Потребуется 15 недель. Это длина критического пути. Максимальная степень распараллеливания — 5. Поэтому работа восьми бригад займет столько же времени, сколько и пяти.

7. Изобразить (схематично), как будет выглядеть стройка через девять недель после начала строительства, если работать будут пять бригад.

Ответ. Построены все четыре бастиона. На всех четырех бастионах установлены орудия.

Построена пристань, проложена дорога к пристани.

Прорыт ров с ЮЗ и ров с СЗ. Построен мост с ЮЗ. Насыпан вал с СВ.

Насыпаны 2/3 вала с ЮЗ.

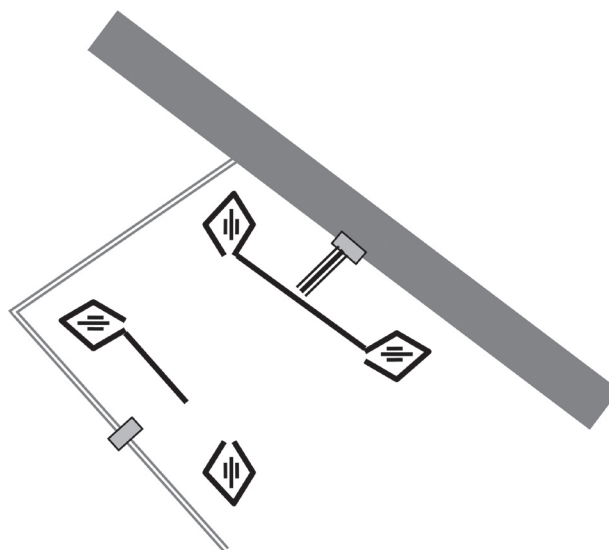


Рис. 4. Состояние стройки через девять недель после начала строительства

8. Определить, с какой стороны происходит подвоз строительных материалов. Ответ обосновать.

Ответ. С юго-востока. Именно эта сторона была в последнюю очередь перегорожена рвом.

9. Каково минимальное количество бригад, которые способны завершить строительство в минимальное время? Ответ обосновать.

Ответ. 4.

Для ответа на этот вопрос посмотрим на сетевой график как на алгоритм строительства крепости и представим этот алгоритм в ярусно-параллельной форме (ЯПФ) [1, 2, 6].

Вообще говоря, можно попробовать обойтись без этого и в качестве ярусно-параллельной формы использовать диаграмму Ганта (рис. 2). Но это довольно неудобно. Во-первых, ЯПФ будет «уложена на бок»: ее высота будет измеряться слева направо, а ширина — сверху вниз. Во-вторых, на ЯПФ все действия одного яруса выполняются одновременно. Поэтому ярусом надо будет считать единицу времени. Это значит, что соседние вершины ЯПФ на диаграмме Ганта будут сливаться в одну линию. Скажем, работа № 20 «Построить северный бастион» занимает 5 единиц времени (5 ярусов). То есть с точки зрения графа ЯПФ эта работа представляет собой 5 вершин,

а на диаграмме Ганта она представлена одной полосой. И, наконец, самое главное: ярусно-параллельная форма должна отображать взаимозависимости между работами, а они на диаграмме Ганта видны плохо.

Для построения ЯПФ воспользуемся алгоритмом из [6]:

- на 1-м ярусе расположим вершины, не имеющие предшественников;
- на 2-м ярусе — вершины, все предшественники которых расположены на 1-м ярусе;
- на 3-м ярусе — вершины, все предшественники которых расположены на 1-м и 2-м ярусах;
- и т. д.

Каждая вершина попадает на ярус, непосредственно следующий за ярусом, на котором закончено размещение ее предшественников. Расположение вершины на ярусе N означает, что последние предшествующие ей вершины были размещены на ярусе $(N - 1)$.

Построенная по этому алгоритму ярусно-параллельная форма алгоритма строительства крепости будет выглядеть следующим образом (рис. 5).

Напомним, что высота ЯПФ, построенной по описанному выше алгоритму, определяет время выполнения алгоритма, а ширина — степень его распараллеливания (т. е. максимальное количество одновременно работающих исполнителей). В нашем случае высота ЯПФ равна 15, а ширина — 5. То есть 5 бригад смогут закончить строительство за 15 единиц времени.

Вопрос: можем ли мы перестроить параллельную форму таким образом, чтобы уменьшить ее ширину и не увеличить ее высоту? Оценим, возможно ли это.

Распределение вершин по ярусам показано в следующей таблице:

Ширина яруса	Количество ярусов	Номера ярусов	Всего вершин
5	5	1, 2, 3, 4, 10	25
4	3	6, 8, 9	12
3	3	5, 7, 11	9
2	1	12	2
1	3	13, 14, 15	3

Всего у нас работы на 51 неделю. То есть в графе ЯПФ — 51 вершина.

Пятнадцать ярусов шириной 4 вмещают 60 вершин, шириной 3 — 45 вершин, шириной 2 — 30 вершин. Так что графы шириной 3 и 2 нас не устраивают. А граф шириной 4 может устроить.

Для обеспечения ширины 4 нам надо передвинуть с «пятиширинных» ярусов по одной вершине. Место для этого есть. Надо проверить, допускают ли это связи между вершинами ЯПФ. Оказывается, да. Мы можем передвинуть с ярусов 1–3 на более узкие ярусы сцепленную пару работ № 17 «Построить пристань» и № 9 «Проложить дорогу к пристани», с яруса 4 — одну из двух работ № 11 «Установить пушки на юг» или № 10 «Установить пушки на запад», с яруса 10 — одну из двух работ: № 14 «Проложить дорогу ЮЗ» или № 15 «Построить ворота СВ». Например, сдвинем работы № 10

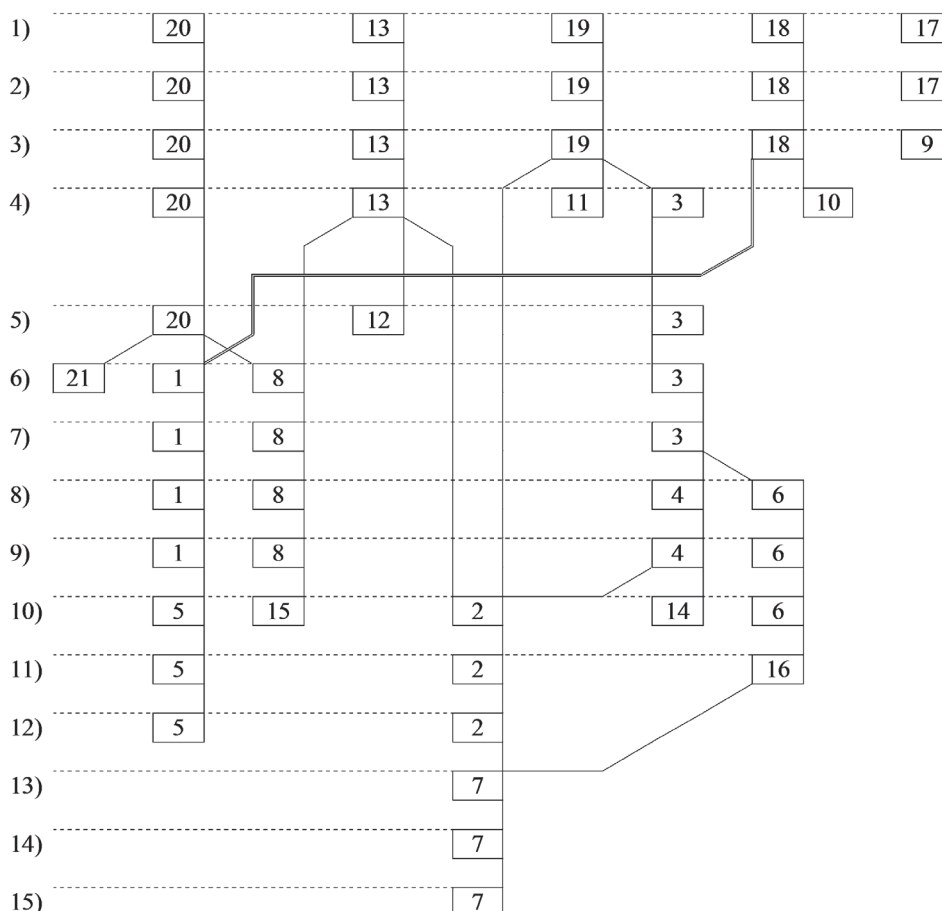


Рис. 5. Ярусно-параллельная форма алгоритма строительства крепости

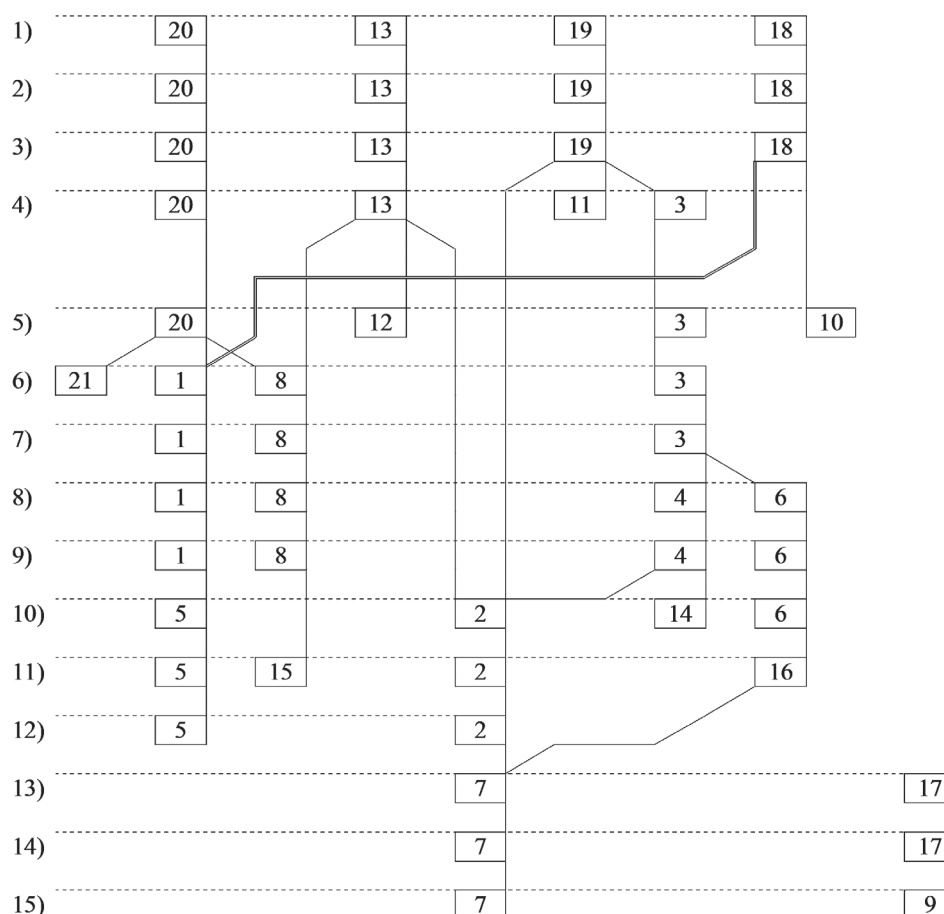


Рис. 6. Ярусно-параллельная форма алгоритма строительства крепости, сокращенная до ширины 4

и № 15 на один ярус (на недели 5 и 11 соответственно), а работы № 17 и № 9 — на последние 3 яруса (на недели 13, 14, 15).

Тогда мы получим ЯПФ шириной 4 при сохранении высоты 15 (рис. 6). То есть строительство за 15 недель могут выполнить 4 бригады.

* * *

Мы разобрали задачу на сетевой график из конкурса «ТРИЗформашка-2015». Аналогичные задачи использовались в конкурсах 2014, 2016 и 2017 годов.

Список использованных источников

1. Воеводин В. В. Вычислительная математика и структура алгоритмов: 10 лекций о том, почему трудно решать задачи на вычислительных системах параллельной архитектуры и что надо знать дополнительно, чтобы успешно преодолевать эти трудности. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во Московского университета, 2010.
2. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
3. Иванова Н. Г., Плаксин М. А., Русакова О. Л. Задачи на параллельное программирование в конкурсе «ТРИЗформашка-2013» // Информационные технологии в образовании. XXIII Международная конференция-выставка: Сборник трудов. Ч. II. М.: Издательский отдел факультета ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова, 2013.

4. Иванова Н. Г., Плаксин М. А., Русакова О. Л. Конкурс «ТРИЗформашка» как площадка для апробации заданий на параллельное программирование // Информатика в школе: прошлое, настоящее и будущее: Материалы Всероссийской научно-методической конференции по вопросам применения ИКТ в образовании, 6–7 февраля 2014 г. Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 2014.

5. Иванова Н. Г., Плаксин М. А., Русакова О. Л. ТРИЗ-формашка // Информатика. 2010. № 5.

6. Плаксин М. А. Пропедевтика параллельных вычислений в школьной информатике. Параллельная форма алгоритма // Информатика в школе. 2016. № 10.

7. Плаксин М. А., Иванова Н. Г., Русакова О. Л. Информатика: учебник для 3 класса: в 2 ч. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013.

8. Плаксин М. А., Иванова Н. Г., Русакова О. Л. Информатика: учебник для 4 класса: в 2 ч. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013.

9. Плаксин М. А., Иванова Н. Г., Русакова О. Л. Набор заданий для знакомства с параллельными вычислениями в конкурсе «ТРИЗформашка» // Преподование информационных технологий в Российской Федерации: Материалы Тринадцатой открытой Всероссийской конференции «ИТ-Образование — 2015» (г. Пермь, 14–15 мая 2015 г.). Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т, 2015.

10. Портни С. И. Управление проектами «для чайников». М.: Вильямс, 2004.

11. Троцкий М., Груча М., Огонек К. Управление проектами. М.: Финансы и статистика, 2006.