

Лабораторная работа № 2

Модель распространения эпидемии. Системная динамика в AnyLogic¹

Краткая теория

“Системная динамика – это подход к имитационному моделированию, своими методами и инструментами позволяющий понять структуру и динамику сложных систем. Также системная динамика – это метод моделирования, использующийся для создания точных компьютерных моделей сложных систем для дальнейшего их использования с целью проектирования более эффективной организации и политики взаимоотношений с данными системами. Вместе эти инструменты позволяют нам создавать микромиры-симуляторы, где пространство и время могут быть сжаты и замедлены так, чтобы мы могли изучить последствия наших решений, быстро освоить методы и понять структуру сложных систем, спроектировать тактики и стратегии для большего успеха.”

Джон Штерман, “Бизнес-процессы: Системное мышление и моделирование сложного мира”

Метод *системной динамики* был изобретен в 1950-х Джейм Форрестером из Массачусетского Технологического Института (MIT). Используя свой научный и инженерный опыт, Форрестер искал способ применения законов физики, в частности, законов электрических цепей, к исследованиям и описанию динамики процессов социальных и экономических систем.

Системная динамика чаще всего используется для разработки долгосрочных стратегических моделей и предполагает высокий уровень агрегации объектов: модели системной динамики рассматривают людей, товары, ресурсы и другие отдельные элементы в количественных терминах.

Системная динамика предоставляет методы изучения динамических систем. Предполагается, что вы:

- Моделируете систему как закрытую структуру, которая сама определяет собственное поведение.
- Обнаруживаете циклы обратной связи, уравнивающего или усиливающего типа. Циклы обратной связи занимают центральное место в системной динамике.
- Задаете накопители и потоки, которые на них влияют.

Накопители характеризуют состояние системы. Они содержат память системы. Модель работает только с совокупностью объектов: отдельные элементы, содержащиеся в накопителе, не различимы. Потоки представляют интенсивность, с которой меняются эти состояния системы.

Если вам сложно разделить понятия потока и накопителя, представьте, что мы ими

¹ Григорьев И. AnyLogic за 3 дня: практическое пособие по имитационному моделированию. - 2022. - 272 с.

измеряем. Накопители обычно используются, чтобы обозначить совокупность людей, уровни запасов, денежные средства или знания, тогда как потоки измеряют количество чего-либо за период времени, например, количество клиентов в месяц или долларов в год.

Цель данной лабораторной работы – научить вас разрабатывать модели системной динамики в AnyLogic.

Практическое задание

Мы построим модель, изучающую распространение инфекционного заболевания среди населения. Давайте рассмотрим численность населения, равную 10 000 человек, которую обозначим как *TotalPopulation*. Вначале заражен только один человек, а все остальные лишь восприимчивы к болезни.

- Во время болезни один человек в среднем контактирует с другими с интенсивностью *ContactRateInfectious*, равной 1.25 человека в день. Если заразившийся человек контактирует с восприимчивым к болезни, то вероятность передачи инфекции *Infectivity* равняется 0.6.
- После того, как человек заражается, инкубационный период
- *AverageIncubationTime* длится 10 дней.
- Средняя длительность болезни после инкубационного периода *AverageIllnessDuration* (другими словами, длительность периода, когда этот человек может заражать других) составляет 15 дней.
- Выздоровевшие люди получают иммунитет к болезни и не могут снова заболеть.

1. Создание диаграммы потоков и накопителей

1. Создайте новую модель, выбрав пункт меню **Файл > Создать > Модель**. Назовите модель *SEIR* и выберите дни в качестве единиц модельного времени.

Давайте начнем с того, что нарисуем диаграмму накопителей и потоков. В данной модели мы не будем учитывать все разнообразие населения, а лишь выделим четыре категории людей, имеющие значение для изучаемого нами процесса:

- *Susceptible* – Восприимчивые к заражению люди, которые еще не были заражены вирусом.
- *Exposed* – Люди, находящиеся в латентной стадии заражения (они уже заражены, но

еще не могут заражать других).

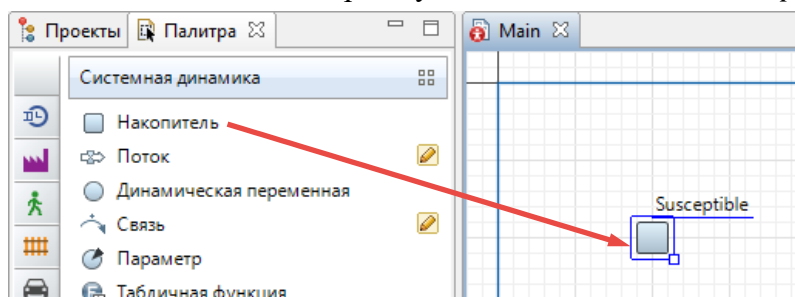
- *Infectious* – Люди в активной стадии заражения (они могут заражать других людей).
- *Recovered* – Выздоровевшие люди (они приобрели иммунитет к данному заболеванию).

Название модели SEIR – это аббревиатура, образованная сокращением названий основных стадий распространения инфекции: Susceptible - Exposed - Infectious - Recovered.

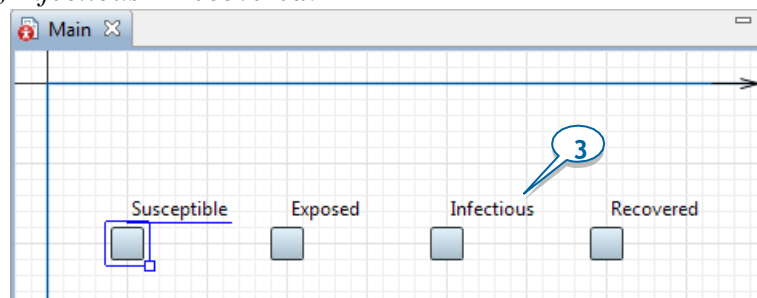
Терминология и общая структура модели взяты из книги ("Compartmental models in epidemiology").

В нашей модели можно естественным образом выделить четыре накопителя, по одному на каждую стадию заболевания. Давайте и начнем с их создания.

2. Откройте палитру **Системная Динамика**. Перетащите элемент **Накопитель** из палитры **Системная динамика** на диаграмму *Main*. Назовите его *Susceptible*.



3. Добавьте еще три накопителя. Расположите их, как показано на рисунке ниже, и назовите *Exposed*, *Infectious* и *Recovered*.



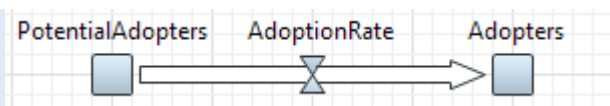
Накопители и потоки

В системной динамике *накопители* (иногда они также называются *уровнями* или *фондами*) представляют собой переменные, которые эквивалентны объему определенного «вещества» (это могут быть деньги, знания, люди, жидкости и т.п.).

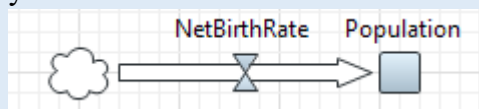
Потоки задают динамику системы. Значения накопителей изменяются с течением времени именно согласно существующим в системе потокам. Входящий в накопитель поток увеличивает значение данного накопителя, исходящий из накопителя поток уменьшает его значение. Ниже приведены примеры накопителей и потоков:

Накопитель	Входящие потоки	Исходящие потоки
Население	Рождаемость	Смертность
	Иммиграция	Эмиграция
Бак с горючим	Заправка	Потребление горючего

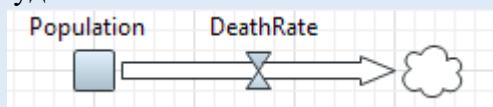
Один и тот же поток может служить исходящим потоком для одного накопителя и входящим - для другого; в этом случае говорится, что это поток из первого накопителя во второй:



Если поток начинает течение "из ниоткуда", то в его начальной точке рисуется общепринятый для таких случаев символ облака.



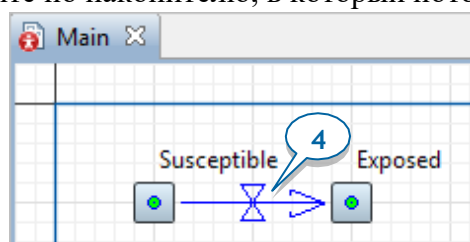
Аналогично, облако рисуется у конечной точки потока, если поток течет не в какой-то другой накопитель, а "в никуда".



Направление стрелки потока обозначает влияние этого потока на накопители.

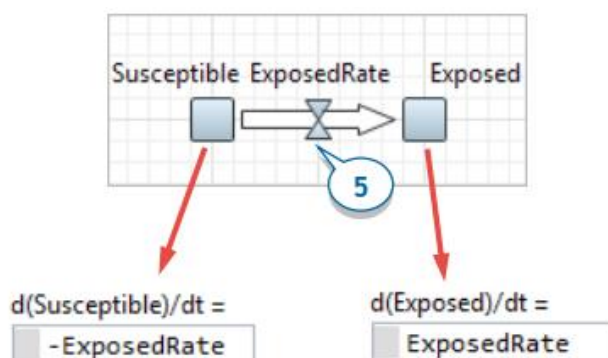
Основная логика нашей модели такова: восприимчивые к заболеванию люди подвергаются заражению вирусом, болеют и заражают других, а затем выздоравливают. Чтобы промоделировать перемещение людей между нашими четырьмя накопителями, нам нужно добавить три потока.

4. Добавьте первый поток, который ведет из накопителя *Susceptible* в накопитель *Exposed*. Сделайте двойной щелчок мышью по накопителю, из которого поток выходит (*Susceptible*) и затем щелкните по накопителю, в который поток входит (*Exposed*).



5. Назовите этот поток *ExposedRate*.

6. Обратите внимание на формулы накопителей *Susceptible* и *Exposed*. Из них следует, что поток *ExposedRate* уменьшает значение накопителя *Susceptible* и увеличивает значение накопителя *Exposed*.



Формулы накопителей

AnyLogic автоматически формирует формулу накопителя в соответствии с создаваемой пользователем диаграммой потоков и накопителей.

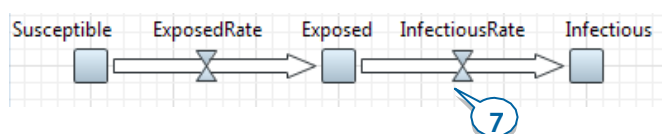
Значение накопителя вычисляется согласно потокам, входящим и исходящим из него. Значения входящих потоков, то есть тех, которые увеличивают значение накопителя, прибавляются к текущему значению накопителя, а значения исходящих потоков,

соответственно, вычитаются из него:

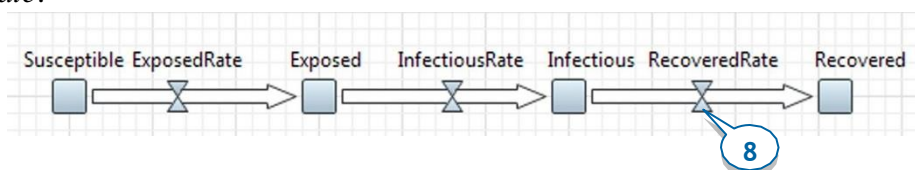
$\text{входящийПоток1} + \text{входящийПоток2} + \dots - \text{исходящийПоток1} - \text{исходящийПоток2} \dots$

В классическом режиме задания формулы накопителя формула является нередактируемой, и в ней могут фигурировать только потоки.

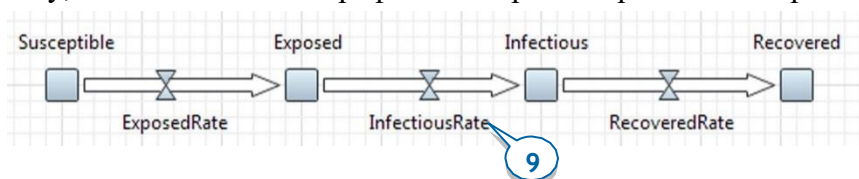
7. Добавьте поток, ведущий из накопителя *Exposed* в накопитель *Infectious*, и назовите его *InfectiousRate*.




8. Добавьте поток из накопителя *Infectious* в накопитель *Recovered* и назовите его *RecoveredRate*.

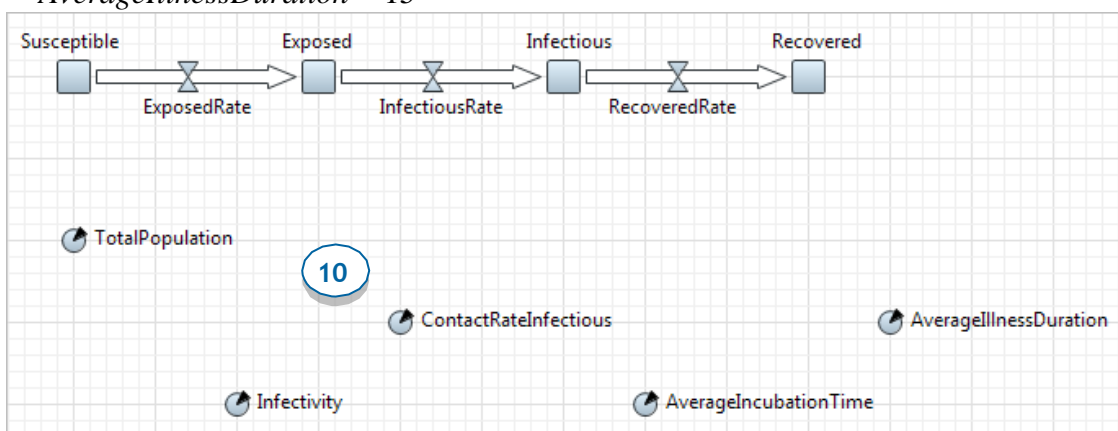


9. Расположите метки с именами потоков, как показано на рисунке ниже. Чтобы переместить метку, выделите поток в графическом редакторе и затем переместите его имя.



10. Теперь давайте зададим параметры и зависимости. Добавьте пять элементов **Параметр** , задайте их имена и значения по умолчанию, как указано ниже:

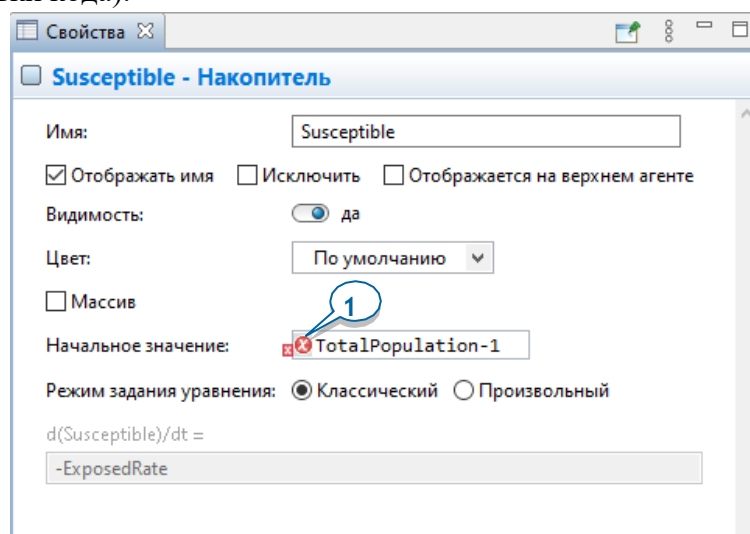
- $\text{TotalPopulation} = 10\,000$
- $\text{Infectivity} = 0.6$
- $\text{ContactRateInfectious} = 1.25$
- $\text{AverageIncubationTime} = 10$
- $\text{AverageIllnessDuration} = 15$



11. Задайте первоначальное количество инфицированных людей, указав значение 1 в качестве **Начального значения** накопителя *Infectious*.

12. Задайте **Начальное значение** накопителя *Susceptible*: $\text{TotalPopulation}-1$.

Вы можете нажать Ctrl+пробел (Mac OS: Alt+пробел) и затем выбрать имя параметра из мастера подстановки кода).



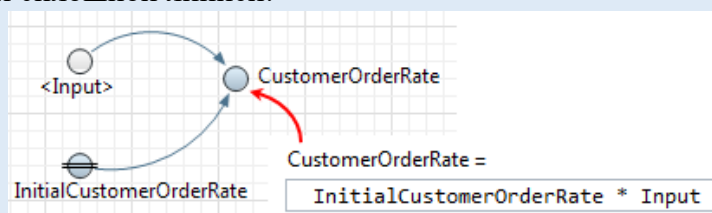
Слева от введенного выражения вы увидите красный значок — индикатор ошибки. Причина ошибки в том, что вы задали логическую зависимость между элементами диаграммы накопителей и потоков (начальное значение накопителя *Susceptible* зависит от параметра *TotalPopulation*), но эта зависимость не задана графически на диаграмме.

Связи зависимостей

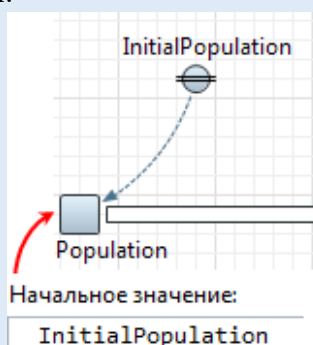
Связь используется для задания зависимости между элементами диаграммы потоков и накопителей.

Зависимости в диаграммах потоков и наполнителей могут быть двух типов:

- Переменная (это может быть накопитель, поток, вспомогательная переменная или параметр) упоминается в формуле потока или вспомогательной переменной. Такой тип связи отображается сплошной линией:



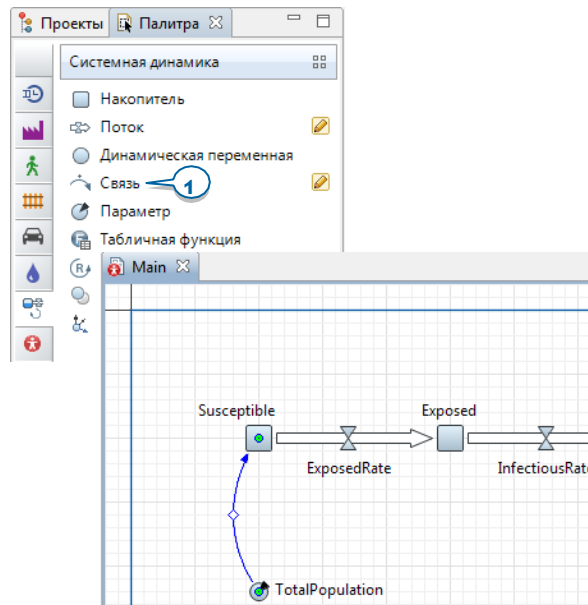
- Переменная фигурирует в формуле начального значения накопителя. Этот тип связи отображается пунктирной линией:



13. Нарисуйте связь, ведущую из параметра *TotalPopulation* в накопитель *Susceptible*:

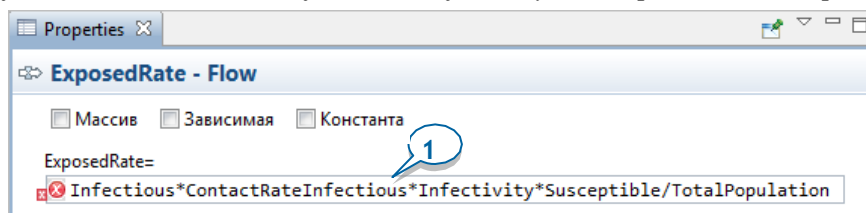
Сделайте двойной щелчок мышью по элементу Связь  палитры Системная динамика,

щелкните по параметру *TotalPopulation* и затем щелкните по накопителю *Susceptible*. Вы увидите связь с точками соединения на ее концах:



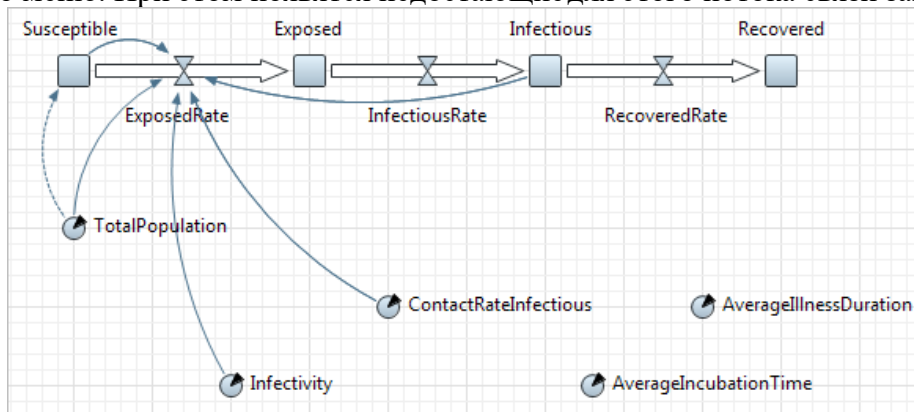
14. Давайте зададим формулу потока *ExposedRate*. Выделите поток щелчком мыши и введите следующую формулу с помощью мастера подстановки кода:

$$Infectious * ContactRateInfectious * Infectivity * Susceptible / TotalPopulation$$



Нам необходимо нарисовать связи зависимостей, ведущие от указанных в формуле переменных и параметров к этому потоку. Может показаться забавным, но в некоторых других инструментах системной динамики все связи придется рисовать вручную. Мы же предпочитаем использовать механизм автоматического создания связей.

15. Щелкните правой кнопкой мыши по потоку *ExposedRate* в графическом редакторе и выберите опцию **Исправить ошибки в связях > Создать недостающие связи из контекстного меню**. При этом появятся недостающие для этого потока связи зависимостей:



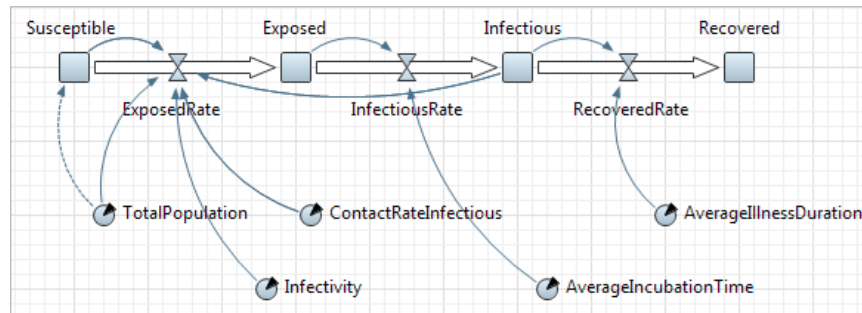
16. Задайте следующую формулу для потока *InfectiousRate*:

$$Exposed / AverageIncubationTime$$

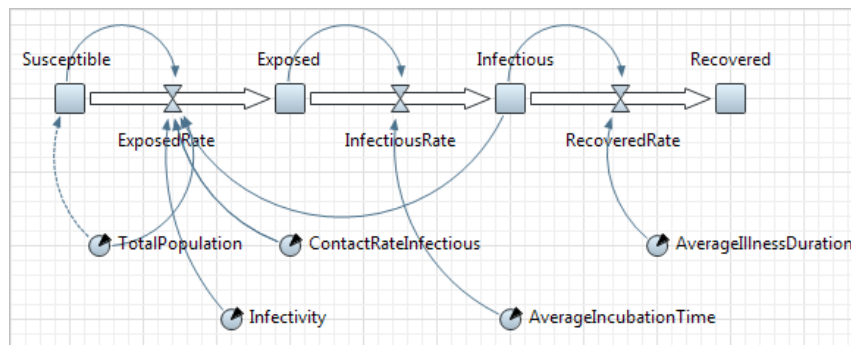
17. Задайте следующую формулу для потока *RecoveredRate*:

Infectious/AverageIllnessDuration

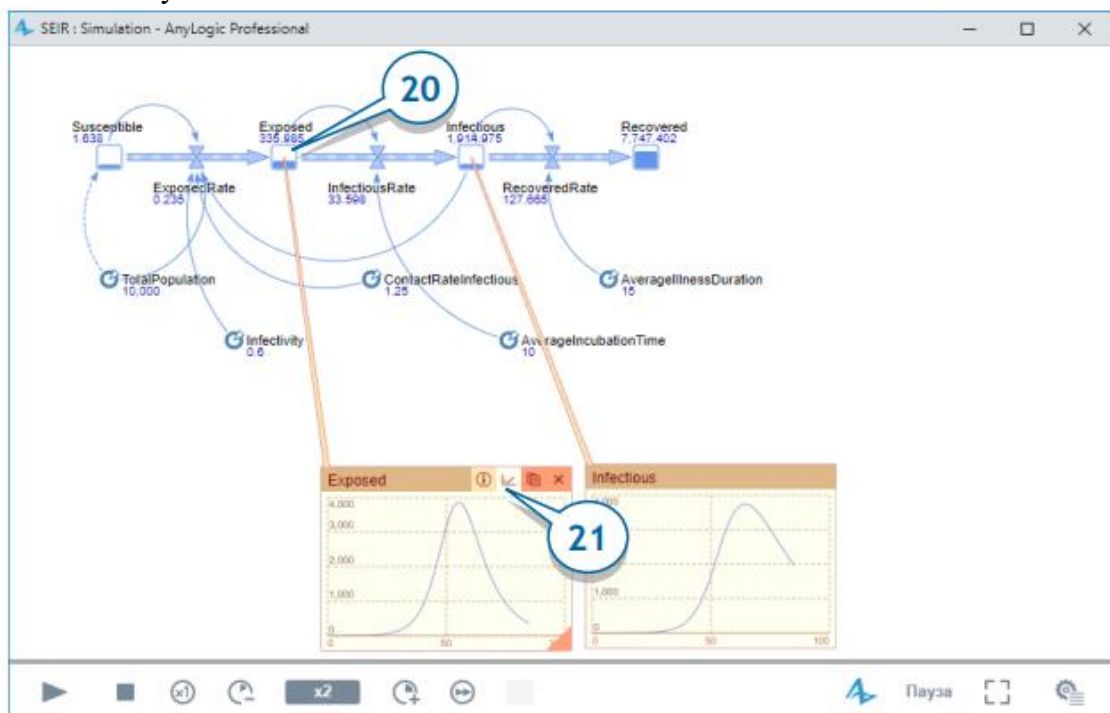
18. Добавьте все недостающие связи зависимостей. В результате диаграмма потоков и накопителей должна будет выглядеть следующим образом:



19. Подкорректируйте вид связей. Измените радиусы дуг связей, чтобы сделать диаграмму более красивой и читаемой, например, как на рисунке ниже. Чтобы изменить изгиб связи, выделите связь в редакторе и перетащите метку, расположенную посередине связи.



20. Запустите модель и исследуйте динамику процесса с помощью похожих на виджеты информационных окон этих переменных. Открыть информационное окно переменной можно, щелкнув мышью по этой переменной. Чтобы изменить размер окна, потяните за правый нижний угол этого окна.



21. Чтобы переключить информационное окно в режим графика, проведите курсором

мышью по заголовку окна и щелкните появившийся справа значок графика.

22. Увеличьте скорость выполнения модели, чтобы моделирование проходило быстрее.

2. Добавление графика для визуализации динамики процесса

Циклы обратной связи: уравнивающие и усиливающие

Системная динамика изучает системы с обратными связями, то есть системы, образованные (возможно, зависящими друг от друга) циклами обратной связи.

Есть два типа циклов обратной связи: *усиливающие* и *уравнивающие*.

Определить тип цикла можно с помощью следующих правил.

Начните с предположения, что значение переменной увеличивается, и проследите за изменением значений входящих в цикл переменных.


Цикл является:

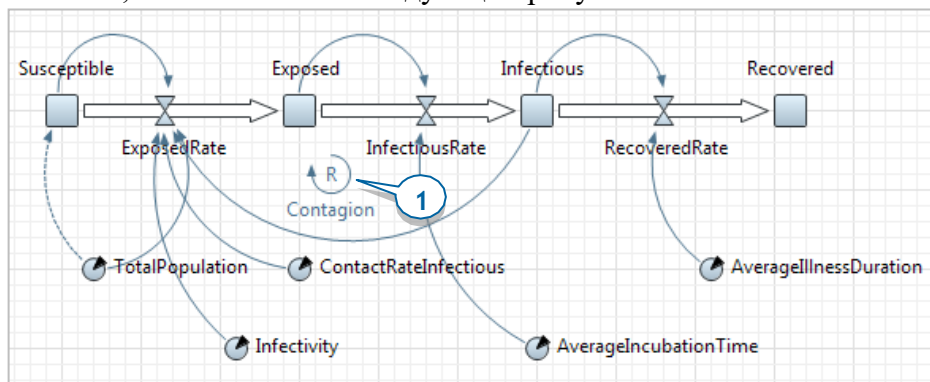
- *усиливающим*, если после прохождения по циклу вы видите тот же результат, что был допущен при начальном предположении;
- *уравнивающим*, если результат противоречит начальному предположению.

Есть и другой способ определения типа цикла:

- *Усиливающие* циклы содержат четное (или нулевое) количество отрицательных связей (то есть, связей, уменьшающих значение зависимой переменной).
- *Уравнивающие* циклы содержат нечетное количество отрицательных связей.


Добавим на диаграмму метку для образовавшегося в нашей системе цикла зависимостей.

1. Перетащите элемент **Цикл**  из палитры **Системная динамика** на диаграмму и расположите его так, как показано на следующем рисунке.





2. Перейдите в панель **Свойства** и измените **Тип** цикла на **R** (что означает *Reinforcing*, то есть «усиливающий»). Оставьте заданное по умолчанию **Направление: по часовой стрелке** и укажите текст, который AnyLogic будет отображать возле значка цикла: *Contagion* (то есть, «заражение»).

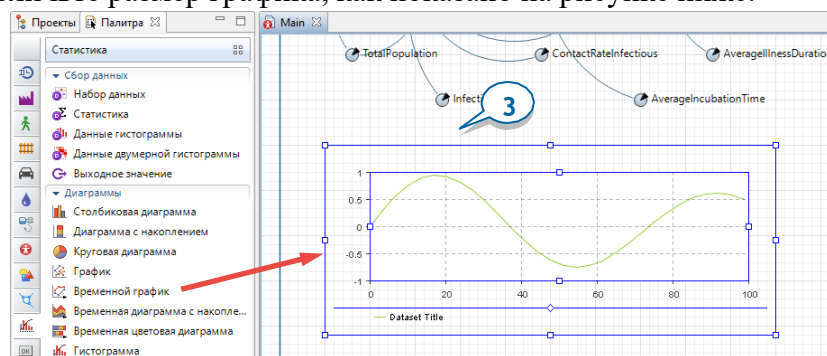
Элемент «Цикл»

Элемент AnyLogic **Цикл**  представляет собой графический значок, состоящий из метки с описанием смысла цикла и стрелки, показывающей направление этого цикла. Элемент не задает саму логику зависимостей в моделируемой системе, а только показывает информацию об образовавшемся цикле влияний переменных друг на друга. Добавляя на диаграмму значки циклов, вы можете облегчить понимание существующих в этой диаграмме циклов обратной связи будущим пользователям этой модели.

Давайте определим тип нашего цикла *Contagion*. Увеличение значения накопителя *Infectious* ведет к увеличению значения потока *ExposedRate*, что в свою очередь увеличивает значение накопителя *Exposed*. Следовательно, цикл *Contagion* является усиливающим. Все связи в этом цикле положительные.


Определите, какие еще циклы присутствуют в моделируемой системе? Каких они типов? Теперь давайте добавим временной график для просмотра динамики изменения численности каждой категории людей в нашей модели.

3. Перетащите элемент **Временной график**  из палитры **Статистика**  на диаграмму и увеличьте размер графика, как показано на рисунке ниже.



4. В панели **Свойства** перейдите в раздел **Данные**. Измените свойства элемента данных, созданного для графика по умолчанию:

- **Заголовок:** *Susceptible people* (то есть, восприимчивые к заболеванию люди).
- **Значение:** *Susceptible* (при введении имени переменной используйте мастер подстановки кода).

5. Добавьте еще три элемента данных, которые будут отображать значения накопителей *Exposed*, *Infectious*, и *Recovered* соответственно. Чтобы добавить элемент, нажмите кнопку  **Добавить**.

Не забудьте проставить каждому элементу соответствующий **Заголовок**.

plot - Временной график

☒ Значение ☐ Набор данных

Заголовок: Exposed people

Значение: Exposed

Стиль маркера:

Толщина линии: 1 pt

Цвет: darkOrange

☒ Значение ☐ Набор данных

Заголовок: Infectious people

Значение: Infectious

Стиль маркера:

Толщина линии: 1 pt

Цвет: magenta

☒ Значение ☐ Набор данных

Заголовок: Recovered people

Значение: Recovered

Стиль маркера:

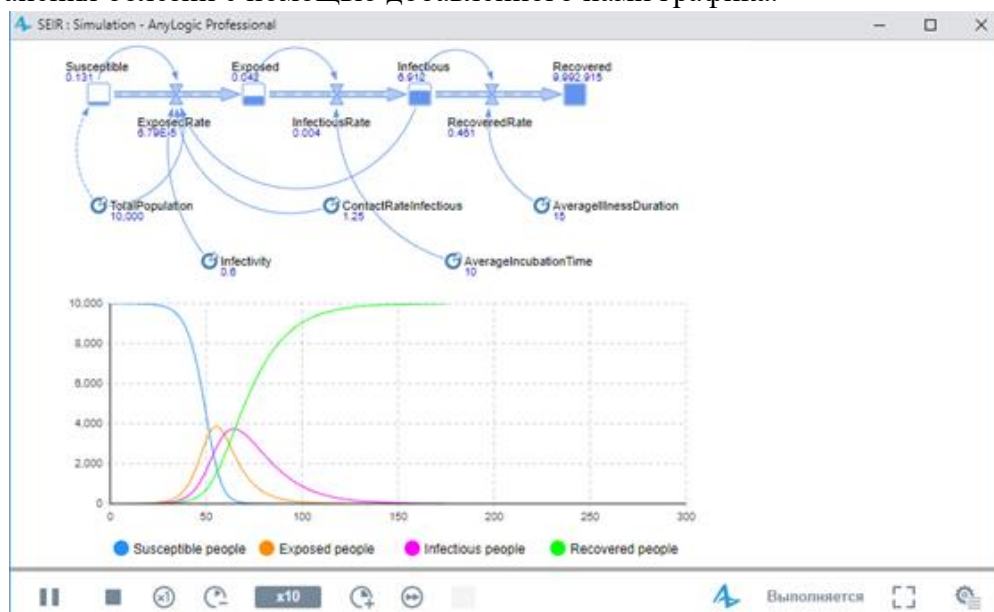
Толщина линии: 1 pt

Цвет: lime

6. Чтобы график собирал данные на протяжении всего времени выполнения модели, в разделе свойств **Обновление данных** измените значение опции **Отображать до:** 300 последних значений.

7. В разделе свойств **Масштаб** убедитесь, что график отражает данные для 300 единиц модельного времени. Для этого установите **Временной диапазон** на 300 единиц мод. времени.

8. Мы закончили создание модели. Запустите ее и наблюдайте за динамикой распространения болезни с помощью добавленного нами графика.



3. Эксперимент варьирования параметров

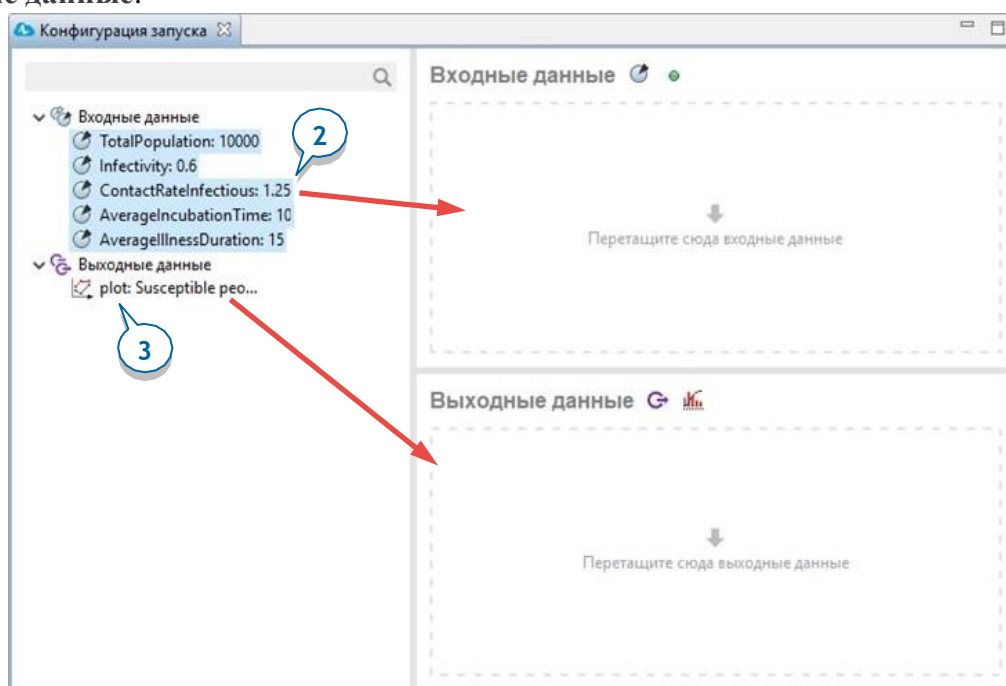
Теперь давайте изучим, как меняется динамика распространения эпидемии при различных значениях интенсивности контактов между людьми, воспользовавшись экспериментом варьирования параметров. Мы запустим этот эксперимент в облачном сервисе («облаке») AnyLogic Cloud.

AnyLogic Cloud

- AnyLogic Cloud — это облачный сервис, позволяющий запускать модели онлайн с любого устройства, в том числе с телефонов и планшетов, и делиться моделями с другими пользователями.
- AnyLogic Cloud — это мощный инструмент для анализа моделей, предлагающий широкий набор экспериментов и средств анализа данных.
- Сервис AnyLogic Cloud располагается на платформе Amazon Web Services и доступен каждому. Даже если вы не используете AnyLogic, вы все равно можете воспользоваться Cloud для получения представления о моделировании.

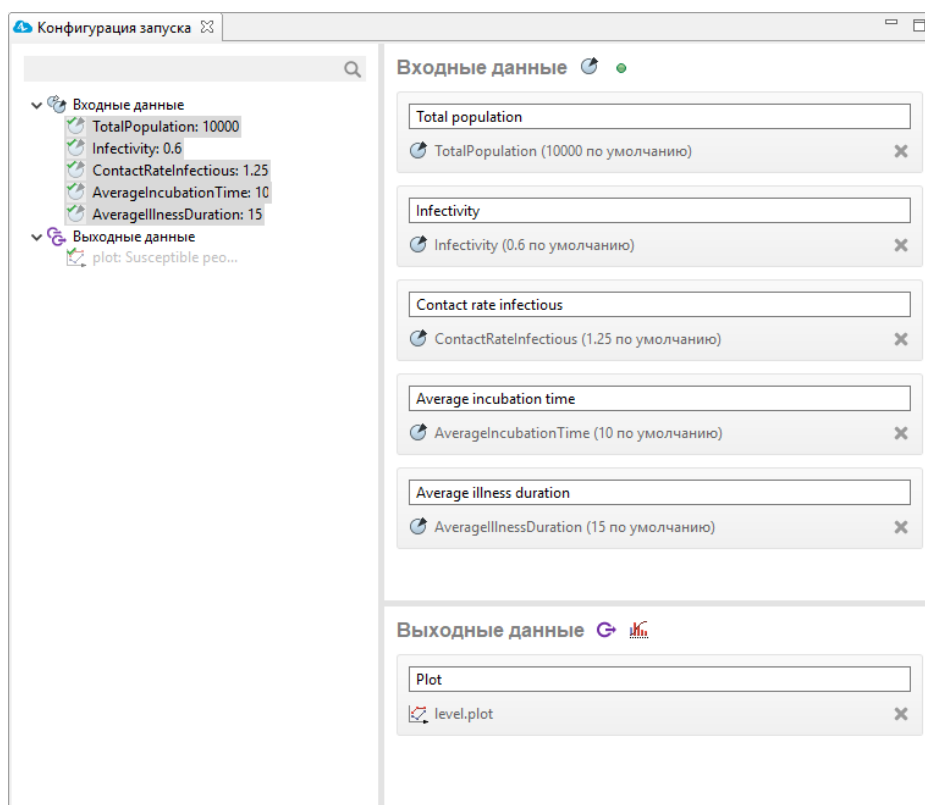
1. Дважды щелкните по элементу **Конфигурация запуска: Main** в панели **Проекты**.

2. Откроется редактор **Конфигурация запуска**. Здесь можно указать входные и выходные данные модели перед тем, как загрузить ее в облако AnyLogic. Выберите все параметры из списка **Входные данные** и перетащите их вправо в пустое пространство **Входные данные**.



3. Перетащите единственный элемент из списка **Выходные данные** (plot) на пустую правую панель **Выходные данные**.

Панели **Входные данные** и **Выходные данные** заполнятся выбранными нами элементами. Когда модель будет экспортирована в AnyLogic Cloud, значения выбранных параметров можно будет регулировать. График будет использоваться для вывода данных облачной модели.



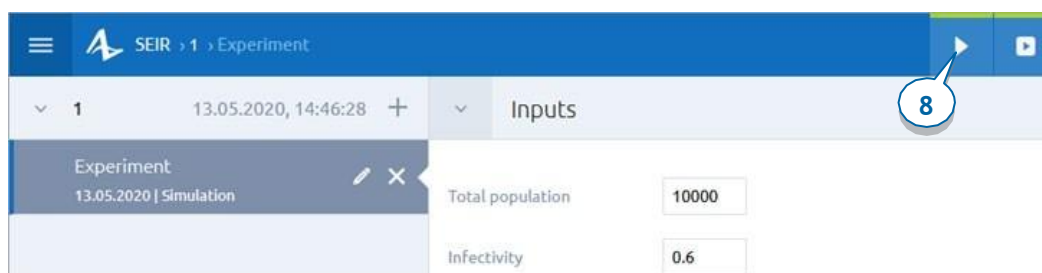
4. Убедимся, что эксперимент моделирует ровно 300 дней: для этого следует ограничить время выполнения эксперимента. На панели свойств **Конфигурации запуска** раскройте раздел **Модельное время**. Выберите **В заданное время** в выпадающем списке **Остановить** и укажите **300** в качестве **Конечного времени**.

5. Щелкните по ссылке **Экспорт модели в облако AnyLogic** в основной части панели свойств.

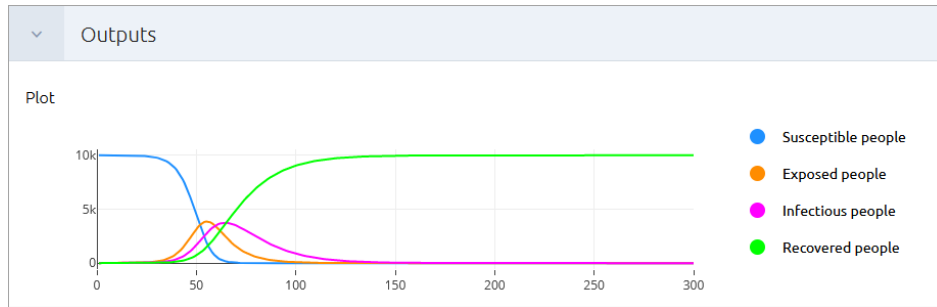
6. Откроется диалоговое окно **Экспорт модели в облако AnyLogic**, с помощью которого нужно зарегистрироваться или авторизоваться в AnyLogic Cloud, а также настроить параметры загрузки модели.

7. После завершения настройки и загрузки, в новой вкладке установленного по умолчанию браузера откроется страница AnyLogic Cloud, автоматически созданная для только что загруженной модели. Обратите внимание – чтобы увидеть эту страницу, необходимо предварительно авторизоваться в Cloud.

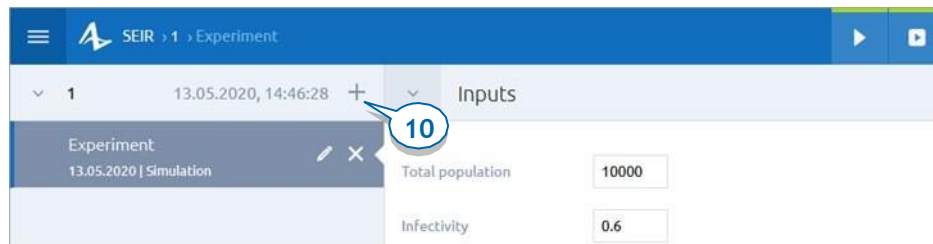
8. Для начала давайте запустим в облаке простой эксперимент. Откройте эксперимент, щелкнув по его имени (*Experiment*) в списке слева, а затем нажмите кнопку **Run** в верхней части веб-страницы.



9. В разделе **Outputs** появится график, похожий на тот, который вы видели после запуска модели в AnyLogic.



10. Давайте создадим другой эксперимент в Cloud. Нажмите кнопку с плюсом сверху на левой панели.



11. Откроется всплывающее окно **New experiment**. В поле **Experiment name** введите **ContactRateVariation**. Выберите **Variation** в выпадающем списке **Experiment Type** и нажмите **Add**.

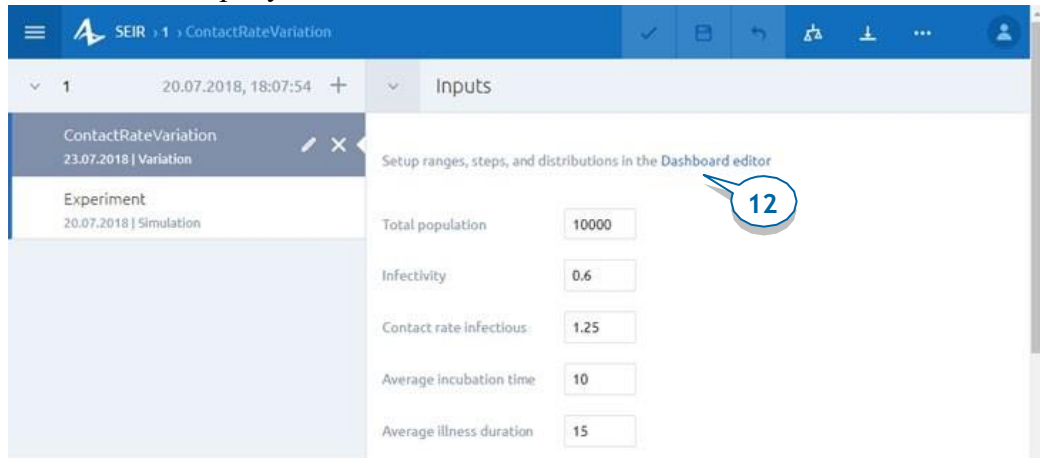
Эксперимент варьирования параметров

С помощью *Эксперимента варьирования параметров* мы можем осуществлять сложное моделирование, в рамках которого производится серия запусков модели с отличающимися значениями одного или нескольких параметров. После завершения эксперимента результаты всех запусков отображаются на одной диаграмме, что позволяет понять, как изменение значений параметров влияет на результат прогона модели.

Если мы запустим эксперимент с фиксированными значениями параметров, мы также сможем оценить влияние случайных факторов на стохастические модели.

12. На левой панели появится еще один эксперимент. В разделе **Inputs** отображаются параметры агента верхнего уровня этого эксперимента: в нашем случае это *Main*. По умолчанию у всех этих параметров фиксированные значения, которые не будут изменяться

в ходе моделирования. Чтобы наш эксперимент варьировал интенсивность контактов зараженных людей, это поведение нужно настроить в **Dashboard editor**. Щелкните по ссылке, показанной на рисунке ниже.

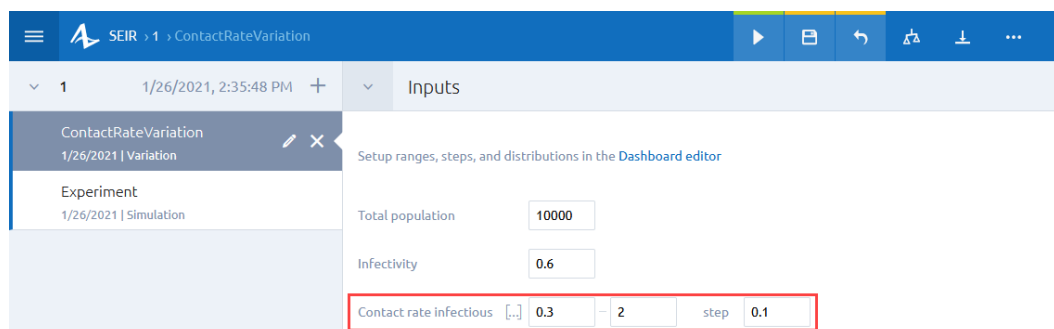


13. Найдите параметр *Contact rate infectious* и измените его тип на **Varied in range** в выпадающем списке.



14. Щелкните по кнопке **Save Dashboard**, чтобы сохранить изменения.

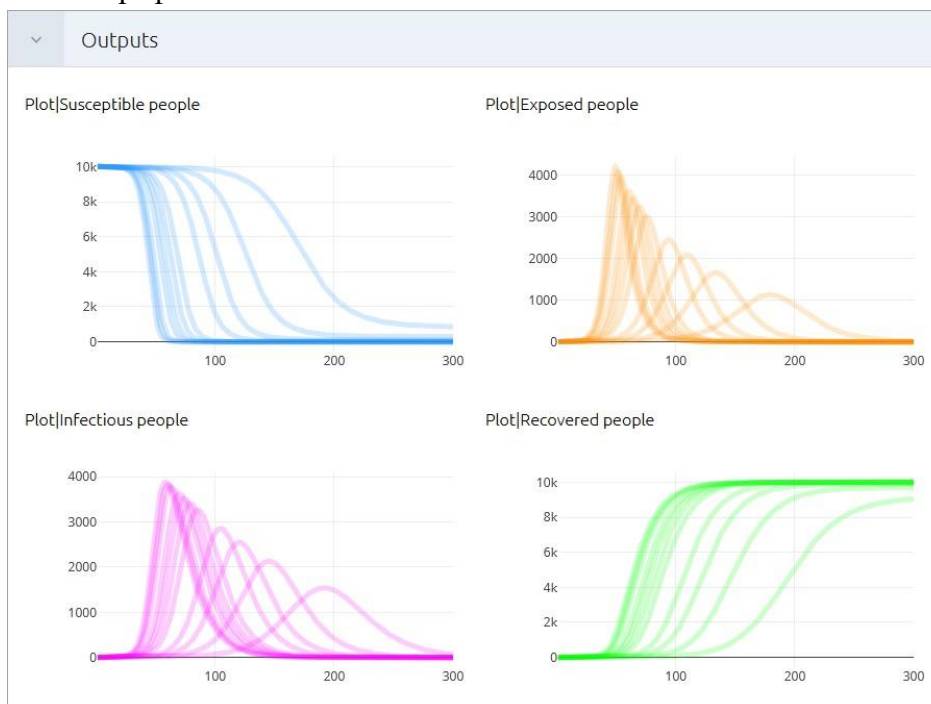
15. Укажите *0.3* в качестве минимального значения параметра, а *2* — в качестве



максимального. В поле **step** введите шаг: *0.1*.

16. Мы готовы запустить эксперимент и понаблюдать за изменением динамики распространения заболевания на нескольких прогонах с помощью графиков. Нажмите кнопку **Run**, чтобы начать эксперимент варьирования параметров.

Эксперимент варьирования параметров произведет несколько прогонов модели с отличающимися значениями параметра *Contact rate infectious* и выведет результаты моделирования на графиках.



Каждый график включает результаты нескольких прогонов (по одной кривой на запуск) — всего 18. Другими словами, мы видим 18 сценариев заболеваемости для разных показателей интенсивности контактов, варьирующихся от 0.3 до 2. Эти сценарии отражают 18 шагов в рамках диапазона значений для параметра, который мы задали ранее.

Наведите курсор мыши на кривую, чтобы увидеть значение параметра, использованное для получения этой кривой. Вы увидите, как увеличение интенсивности контактов позволяет инфекции распространяться быстрее.

Контрольные вопросы

1. В каких задачах используются модели системной динамики?
2. Что такое накопители в моделях системной динамики?
3. Что такое потоки в моделях системной динамики?
4. Что обозначает значок объект облачко?
5. Каким образом формируются формулы накопителя в Anylogic?
6. Как вычисляются значения накопителя и входящих потоков?
7. Для чего используются связи зависимостей в моделях системной динамики Anylogic?
8. Каких двух типов могут быть зависимости в диаграммах потоков и наполнителей?
9. Как задать формула для потока в Anylogic?
10. Как изменить радиусы связей и для чего это можно делать?
11. При погоне модели системной динамики как просмотреть динамику процесса в виде графиков?
12. Какие циклы обратной связи существуют в Anylogic?
13. Для чего используется элемент «Цикл»?
14. Как добавить временной график в модель системной динамики?
15. Опишите особенности облачного сервиса («облака») AnyLogic Cloud?

16. Какие действия нужно проделать, что бы осуществить запуск модели в облачном сервисе AnyLogic Cloud?
17. Что представляет собой эксперимент варьирования параметров?
18. Где можно настроить **Dashboard editor**?