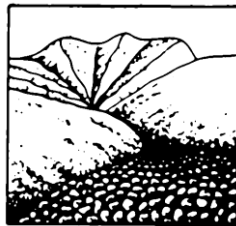


DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 5th International Conference

Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018



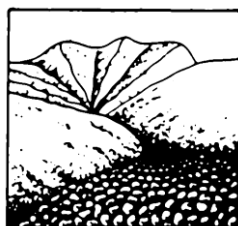
Editors
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Publishing House “Universal”
Tbilisi 2018

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
5-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г.



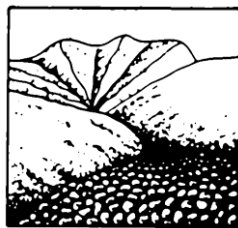
Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили

Издательство Универсал
Тбилиси 2018

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე-5 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 1-5 ოქტომბერი, 2018



რედაქტორები
ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი

გამომცემლობა "უნივერსალი"
თბილისი 2018

УДК 551.311.8
ББК 26.823

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г. – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. – Тбилиси: Универсал, 2018, 671 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018. – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. – Tbilisi: Publishing House “Universal”, 2018, 671 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე-5 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018. გამომცემლობა "უნივერსალი", თბილისი 2018, 671 გვ. პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი.

Ответственные редакторы С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили
Edited by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Верстка: С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева, Е.А. Савернюк
Page-proofs: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva, E.A. Savernyuk

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).
Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman’s book on Debris Flows (Moscow: Geografiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-9941-26-283-8

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა
მეურნეობის ინსტიტუტი



Прогнозирование возникновения водоснежных потоков

П.А. Черноус¹, А.В. Волков², Д.П. Соколова³

¹Самозанятый, Бугры, Россия, pchernous48@gmail.com

²ОАО «Апатит», Кировск, Россия, avolkov@phosagro.ru

³СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, dariia.sokolova@yandex.ru

Приводится обзор существующих методов прогнозирования возникновения водоснежных потоков. Показано, что полностью формализованные методы практически отсутствуют. Анализируются проблемы, мешающие их созданию, и возможные пути решения этих проблем. Дается описание проекта разработки основ прогнозирования возникновения водоснежных потоков.

водоснежные потоки, возникновение, моделирование, прогнозирование

Slushflow release forecasting

P.A. Chernous¹, A.V. Volkov², D.P. Sokolova³

¹Self-employed, Bugri, Russia, pchernous48@gmail.com

²"Apatit" JSC, Kirovsk, Russia, avolkov@phosagro.ru

³SPSU, St. Petersburg, Russia, e-mail: dariia.sokolova@yandex.ru

A review of existing methods for the slushflow release forecasting is given. It is shown that the completely formalized methods for that are practically absent. Problems that hinder their creation and possible ways to solve them are considered. A project on working out of the fundamentals of the slushflow release forecasting is given.

slushflow release, simulation, forecasting

Введение

Водоснежные потоки (ВСП) – опасное стихийно-разрушительное явление, изучаются уже более полувека [Washburn, Goldthwait, 1958] (рис. 1). Достаточно изучена география [Onesti, Hestnes, 1989; Атлас снежно-ледовых ресурсов Мира, 1997; Perov, 1998], гидрометеорологические условия их возникновения и режим [Onesti, 1985; Перов, Сидорова, 1988; Hestnes и др., 1994; Божинский и др., 2001; Сапунова, Сапунов, 2004; Gude, Scherer, 1998], исследованы формы рельефа, в которых они возникают [Onesti, 1987; Hestnes], есть успехи в моделировании их движения [Kobayashi и др., 1994; Божинский, Назаров, 1998] оцениваются изменения активности ВСП в связи с изменением климата [Sidorova и др., 2001; Hestnes и др., 2017], предлагаются меры предотвращения ущерба от ВСП [Bahson, 1998; Hestnes, Sandersen, 1998], в том числе включающие строительство защитных сооружений. Однако, методы краткосрочного прогнозирования ВСП разработаны очень слабо. Это касается как фоновых, так и детальных прогнозов. Целью настоящей работы является обзор существующих методов прогнозирования ВСП, а также анализ нерешенных проблем, препятствующих их



совершенствованию и рассмотрению перспективных подходов, которые могут позволить улучшить ситуацию в этой области.



Рис. 1. Место отрыва ВСП в Хибинах. Фото Б.Б. Вахмистрова.

Обзор существующих методов

Для начала рассмотрим, где прогнозируются ВСП. Известно, что предупреждения о возможном возникновении ВСП на более или менее регулярной основе составлялись или составляются для некоторых мест хребта Брукса, Аляска (Департамент транспорта штата Аляска), Хибин (противолавинная служба ОАО «Апатит»), Полярного Урала (подразделение ОАО «Норильский никель») и гор Норвегии (Норвежский геотехнический институт, Норвежский метеорологический институт, Норвежский директорат водных ресурсов и энергии, Норвежская администрация общественных дорог). Известно, что ВСП отрываются, как правило, в одних и тех же местах, поэтому и прогнозирование их осуществляется для этих мест или групп таких мест. Прогнозирование осуществляется либо полностью субъективно, либо с использованием некоторых ранее полученных зависимостей между возникновением ВСП и сопутствующими им условиями. В качестве таких зависимостей используются эмпирические зависимости между температурой воздуха и сходом ВСП, между количеством жидких осадков, их интенсивностью и сходом ВСП, между уровнем воды в снежном покрове и сходом ВСП, между расчетным количеством воды поступающей в снежный покров за счет всех источников и сходом ВСП. При этом учитывается высота снежного покрова в местах схода ВСП. Для всех этих зависимостей найдены диапазоны значений влияющих факторов при которых происходил сход лавин. Если текущие значения измеряемых или расчетных характеристик (факторов) попадают в эти диапазоны, то это является лишь поводом насторожиться и проанализировать ситуацию более глубоко на предмет возможности схода ВСП.

Полностью формальных методов, связывающих значения текущих характеристик, влияющих на сход ВСП – предикторов и категорическое заключение о сходе или не сходе ВСП либо их вероятностях в определенный промежуток времени – предиктантов, в настоящее время не существует. Главной причиной этой ситуации является односторонний анализ предикторов. Они анализируются (определяются критические значения) лишь для ситуаций, связанные со сходом ВСП, что не позволяет сделать корректное заключение о связи предикторов с предиктантом. Такой анализ мог бы быть



полезен лишь в единственном случае – когда области значений предикторов для «ситуаций с ВСП» и «ситуаций без ВСП» не пересекаются. К сожалению, таких предикторов нет. Учитывают то что множества ситуаций «с ВСП» и «без ВСП» всегда пересекаются в пространстве предикторов, в рамках совместного проекта АО "Апатит" и Норвежского геотехнического института [*Chernous u др., 1998; Черноус и др., 2000*] в 1996 г. были разработаны две формальные методики диагностики (прогнозирования с нулевой заблаговременностью) ситуаций, связанных с возникновением ВСП, использующие линейный дискриминантный анализ и формулу Байеса при разделении ситуаций в Хибинах и горах Норвегии. Они позволяют осуществлять фоновую диагностику ситуаций, связанных с образованием ВСП для различных высотных уровней на которых они возникают. В качестве диагностических признаков в методиках используется стандартная метеорологическая информация, приведенная с помощью интерполяции к этим высотным уровням. На их основе рассчитывалось поступление воды на условную горизонтальную поверхность за счет осадков и таяния, рассчитанного с помощью теплобалансовой модели [*Harstveit, 1984*].

Разделение ситуаций проводится в пространстве двух переменных: суточное поступление воды и высота снега на ближайшем к месту отрыва ВСП высотном уровне. Заключение о принадлежности ситуации к одному из двух классов даются в вероятностной и категорической форме. Используя данные скользящих суток, результаты диагностики могут обновляться с периодичностью метеорологических наблюдений (обычно через три часа). Методики опробованы на независимой выборке, показали хорошее качество диагностики и уже много лет используются в оперативной работе противолавинной службы АО "Апатит" [*Черноус и др., 2014*]. Как методики фоновой диагностики (в Хибинах возможность возникновения ВСП оценивается на площади около 700 км²) возникновения ВСП они являются первыми, которые полностью формализованы и опробованы. Все остальные количественные методы, используемые при прогнозировании возникновения ВСП, являются лишь вспомогательными инструментами, которые помогают создавать такие прогнозы. Считается, что субъективные прогнозы таких малоизученных явлений, как лавины и ВСП, созданные на основе формальных моделей, но в которых в неявном виде учтены знания и опыт прогнозиста, более точны, чем прогнозы, полученные просто с помощью этих формальных моделей. Оказалось, что это не всегда так [*Chernouss, 2000*]. Иногда, для явлений, контролируемых большим количеством переменных (предикторов), результат прогнозирования с помощью лишь формальных моделей (методик) может оказаться лучше. В любом случае, результаты прогнозирования, полученные на основе этих двух подходов, необходимо сравнивать.

Проблемы прогнозирования ВСП и их причины

Потребности практики требуют развития надежных формальных методов прогнозирования ВСП. Таких методов сейчас нет. Не предпринимались даже попытки создать количественную модель прогнозирования ВСП в отдельном водосборе. Их отсутствие можно объяснить недостаточной ясностью механизмов возникновения ВСП и недоступностью необходимой для прогнозирования исходной информации. Для использования в качестве основы прогнозирования статистических методов, методов распознавания и некоторых других методов требуются большие объемы информации, как о сходах ВСП и сопутствующих им условиях, так и об условиях, при которых ВСП не возникали. Учитывая редкость явления и относительно небольшие периоды наблюдений и размеров территорий, где они проводились, соблюсти это условие для отдельного водосбора практически невозможно. Задача заключается в формировании однородных массивов данных об условиях образования ВСП, привязанных к водосборам, а не к местам проведения измерений. Особенно это касается метеорологической информации и информации о снеге. Единственной возможностью ее решения для прошлых событий в тех местах, где специализированные наблюдения не



проводились, является интерполяция. Но нет ясности, каково влияние различий характеристик в местах, где получается исходная для прогнозирования информация, и в водосборах, в которых возникают ВСП. Этот вопрос требует отдельного исследования. Физически обоснованные модели возникновения ВСП существуют в виде довольно общих концепций, до расчетной стадии не доведены, а проверка их соответствия реальности не проводилась. Нет ответа на вопрос - что представляют собой механизмы возникновения? Начинается ли сход ВСП со сдвига на подложке, отрыва в зоне растяжения или прорыва изнутри за счет избыточного давления воды в подснежном канале. Кроме того, для создания методик прогнозирования ВСП необходимо определиться с пространственным и временным масштабами, на которые эти методики распространяются, формулировками прогнозов и оценками качества прогнозирования. Для этого необходимо определиться с формой результатов, которые мы хотим получить. Т.е. с формулировками прогнозов, которые устраивали бы как потребителей прогнозов, так и прогнозистов. Это достаточно важный момент, который часто упускается при создании прогностических моделей. Необходимым элементом разработки любого метода прогнозирования является проверка его успешности. За исключением оценки качества методов [Chernous *и др.*, 1998; Черноус *и др.*, 2000] на Хибинских данных и данных для гор Норвегии, оценки качества прогнозирования ВСП не осуществлялись. Несколько слов о заблаговременности прогнозов. Имеющиеся эмпирические модели возникновения ВСП являются фактически диагностическими. Трансформация их в прогностические осуществляется с помощью использования в качестве входных данных для них прогностической информации о погоде. Имеется опыт использования для этих целей прогнозов погоды 10-и суточной заблаговременности [Jaedike *и др.*, 2013], но надежных оценок влияния заблаговременности на качество прогнозов нет. При очень небольшой заблаговременности при прогнозировании часто используется инерционный метод, подразумевающий, что ситуация будет меняться в сторону «с ВСП» либо «без ВСП» таким же образом, как она изменялась до этого. Т.е. речь идет о простой экстраполяции некоторого индекса (или вероятности) возникновения ВСП в течение прогностического периода. Пока нет достаточной ясности о продолжительности предыстории существенно влияющей на возникновение ВСП. Это еще предстоит выяснить. Конечно такие оценки необходимо делать относительно определенных наборов предикторов, использующихся в прогностических моделях.

Для решения проблем, возникающих при прогнозировании ВСП, помимо теоретических построений и сбора существующей информации, придется организовывать специальные наблюдения, полевые, лабораторные и численные эксперименты. Вместе с тем, уже сейчас существуют возможности улучшить ситуацию в этом вопросе. Авторы настоящей статьи являются организаторами и участниками проекта разработки основ количественных методов прогнозирования возникновения ВСП кратко изложенного ниже.

Проект разработки основ прогнозирования возникновения ВСП

В рамках проекта планируется два варианта создания прогностических моделей. В первом, будет использован подход, основанный на разделении ситуаций в пространстве предикторов (ситуации «с ВСП» и «без ВСП») на основе вероятностно-статистических методов классификации или методов распознавания образов. Во втором, в качестве основы прогностического метода будут использоваться физически обоснованные модели возникновения ВСП (отрыва, сдвига, прорыва, а предикторами будут случайные величины. В обоих вариантах прогнозы могут быть сформулированы в вероятностной и категорической формах. Во втором варианте вероятностные оценки возможности возникновения ВСП будут получаться с помощью статистического моделирования. В качестве предикторов будет использоваться стандартная метеорологическая информация и результаты снегосъемок в водосборе, а также морфологические и морфометрические характеристики рельефа в местах отрыва ВСП и расчетные

гидрологические характеристики. На их основе, с использованием модели развития снежной толщи, Snowpack (<https://models.slf.ch/docserver/snowpack/html/references.html>) и статистического моделирования будут генерироваться поля характеристик снега (толщины, плотности, температуры, прочности) в водосборе. Характеристики стока в местах возникновения ВСП будут определяться с помощью гидрологической модели с распределенными параметрами Гидрограф (<http://www.hydrograph-model.ru/index.php?menu=2>). Специальные полевые измерения с высоким пространственным и временным разрешением, необходимые для создания метода прогнозирования, будут проводиться в Хибинах в 1-2 водосборах где сходят ВСП (рис. 2). Метеорологические наблюдения планируется проводить с помощью автоматических метеостанций, расположенных на различных высотных уровнях непосредственно в водосборах или вблизи них.

При выполнении проекта будут использованы гидрометеорологические данные с ближайших метеостанций для оценки качества их интерполяции в места зарождения ВСП. Там же будут проводиться измерения температуры внутри снежного покрова и на его поверхности, структуры снега и плотности его слоев и их прочностных характеристик. Помимо указанных наблюдений планируется проводить измерения толщины снежного покрова в водосборах с помощью наземного лазерного сканирования с помощью специализированного для сканирования снежных поверхностей сканера Riegl VZ-6000 с высокой точностью (ошибка не более 10 см) и высоким пространственным разрешением (не более 1 м). Гидрологическая часть наблюдений будет состоять из измерений гидростатического давления в подснежных каналах, уровней и расходов воды в снежном покрове и нескольких створах водотоков.

Регистрация ВСП будет осуществляться с помощью специализированного комплекса сигнализации [Пильгаев и др., 2017] и автономных камер видеонаблюдения. Для калибровки и тестирования метода будут использованы архивные данные, имеющиеся для Хибин и других районов. Для оценки влияния водонасыщенности снега на его прочностные характеристики потребуются лабораторные и полевые исследования. В ходе выполнения проекта планируется проанализировать и количественно оценить источники ошибок, влияющих на качество прогнозирования. Работы рассчитаны на несколько лет. Проект открыт для всех желающих принять в нем участие. Причем на всех этапах. От проведения наблюдений и разработки моделей до оценки качества методик прогнозирования ВСП.

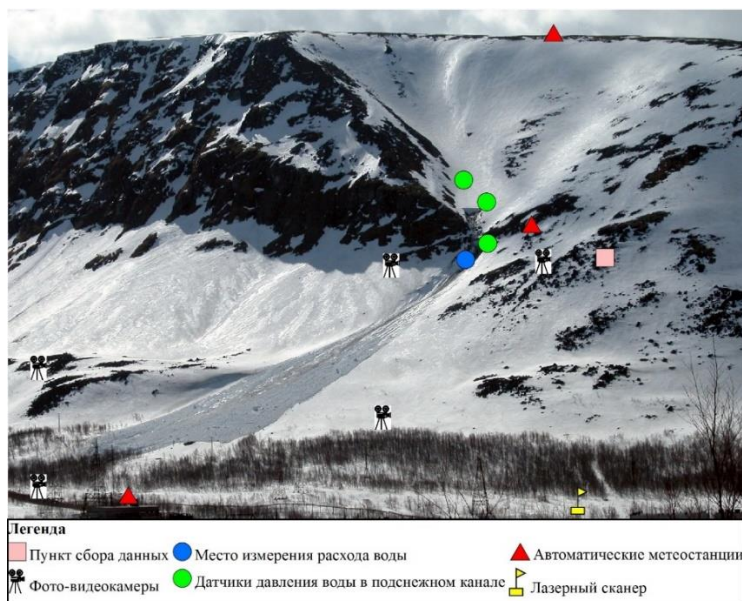


Рис. 2. Один из Хибинских водосборов, в котором возникают ВСП и где планируются специальные наблюдения.



Список литературы

- Атлас снежно-ледовых ресурсов Мира (1997). Том I и II. М., Российская академия наук.
- Божинский А.Н., Евтеев А.О., Мягков С.М., Перов В.Ф., Сапунов В.Н., Сапунова Г.Г., Фрейдлин В.С. (2001). Водоснежные потоки Хибин. М., Изд-во Моск. ун-та, 168 с.
- Божинский А.Н., Назаров А.Н. (1998). Двухлопная модель водоснежного потока. Вестник Московского университета. Серия 5, география, 5: 22-27.
- Перов В.Ф., Сидорова Т.Л. (1988). Метеорологические условия формирования водоснежных потоков. Материалы гляциологических исследований, 64: 41-47.
- Пильгаев С.В., Черноус П.А., Филатов М.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В., Агеев И.В. (2017). Комплекс лавинной сигнализации и результаты его испытаний. В кн.: III Международный симпозиум «Физика, химия и механика снега». Сб. трудов. Южно-Сахалинск, Сахалинский филиал ФГБУН ДВГИ ДВО РАН, 31-36.
- Сапунова Г.Г., Сапунов В.Н. (2004). Механизм и условия образования водоснежных потоков ранневесенних оттепелей (на примере Хибин). В кн.: Снежные лавины, сели и оценка риска. М., Географический факультет МГУ, 59-71.
- Черноус П.А., Тяпкина О.Ю., Хестнес Е., Баккехуа С. (2000). Диагностика и прогноз ситуаций, связанных с образованием водоснежных потоков. Материалы гляциологических исследований, 88: 113-117.
- Черноус П.А., Мокров Е.Г., Тяпкина О.Ю. (2014). Прогнозирование водоснежных потоков в Хибинах. Опыт и перспективы. В кн.: III Международная конференция «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Сборник докладов, Южно-Сахалинск, 22-26 сентября 2014 г., изд. Сахалинского филиала ФГБУН ДВГИ ДВО РАН. Южно-Сахалинск, 159-162.
- Bahnson R. (1998). Avalanche control in the Brooks Range of Alaska an environment of extremes. International Snow Science Workshop, Sunriver, Oregon, 8-12.
- Chernouss P. (2000). An experience of avalanche diagnostic and forecast models verification. International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana, Proceedings, 81-85.
- Chernouss P., Tyapkina O., Hestnes E., Bakkehoi S. (1998). The differentiation of thaws in connection with slushflow occurrences. Proceedings of the International Conference in Voss, NGI, publication 203, Oslo, 89-93.
- Gude M., Scherer D. (1998). Snowmelt and slushflows: hydrological and hazard implications. Annals of Glaciology, 26: 381-384.
- Harstveit K. (1984). Snowmelt modelling and energy exchange between the atmosphere and a melting snow cover. Bergen. University of Bergen. Geophysical Institute. (Scientific Report 4).
- Hestnes E. (1985). A contribution to the prediction of slush avalanches. Annals of Glaciology, 6: 1-4.
- Hestnes E., Bakkehoi S., Jaedicke C. (2017). Global warming reduces the consequences of slushflows. III Международный симпозиум «Физика, химия и механика снега». Сборник трудов, Южно-Сахалинск, Сахалинский филиал ФГБУН ДВГИ ДВО РАН, 95-100.
- Hestnes E., Bakkehoi S. (1995). "Prediction of slushflow hazard" Objectives and procedures of an ongoing research project in Rana, North Norway. Les apports de la recherche scientifique a la securite neige, glace et avalanche. Actes du colloque, Chamonix, France, 30 mai/3 juin 1995, Cemagref editions, 335-340.
- Hestnes E., Bakkehoi S., Sandersen F., Andresen L. (1994). Weather and snowpack conditions essential to slushflow release and downslope propagation. International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, Proceedings, 40-57.
- Hestnes E., Sandersen F. (1998). Slushflow hazard control. A review of mitigative measures. Proceedings of the International Conference in Voss, NGI, publication 203, Oslo, 140-147.
- Hestnes E. (1998). Slushflow hazard – Where, why and when? 25 years of consulting and research. Annals of Glaciology, 26: 370-376.
- Jaedicke C., Hoydal O.A., Midtbo K.H. (2013). Identification of slushflow situations from regional weather models. International Snow Science Workshop, Grenoble – Chamonix Mont-Blanc. Proceedings, 177-182.
- Kobayashi S., Izumi K., Kamiishi I. (1994). Slushflow disasters in Japan and its characteristics. International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, Proceedings, 657-665.
- Onesti L.J., Hestnes E. (1989). Slushflow questionnaire. Annals of Glaciology, 13: 226-230.
- Onesti L.J. (1985). Meteorological conditions that initiate slushflows in the Central Brooks Range, Alaska. Annals of Glaciology, 6: 23-25.
- Onesti L.J. (1987). Slushflow release mechanism: A first approximation. Avalanche Formation, Movement and Effects (Proceedings of the Davos Symposium, September 1986), IAHS Publ. no. 162, 331-336.
- Perov V.F. (1998). Slushflows: Basic properties and spreading. 25 Years of Snow Avalanche Research. Voss, 203-209.



- Sidorova T., Belaya N., Perov V. (2001). Distribution of slushflows in northern Europe and their potential change due to global warming. *Annals of Glaciology*, 32: 237-240.
- Washburn A.L., Goldthwait R.P. (1958). Slushflows. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 69: 1657-1658.